



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **ALUMIININ JA HIILIKUITUKOMPOSIITIN VÄLISEN LIIMALIITOKSEN OPTIMOINTI**

Aapo Hölsä

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Helmikuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Alumiinin ja hiilikuitukomposiitin välisen liimaliitoksen optimointi

Aapo Hölsä

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 53 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: Perttu Niskanen, Hannu Lahtinen

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on perehtyä kirjallisuuslähteiden avulla liimaliitosten optimointiin. Optimointimenetelmiä tarkastellaan erityisesti alumiinin ja hiilikuitukomposiitin liittämistä ajatellen. Kirjallisuustutkimuksen perusteella käsiteltäviksi optimointimenetelmiksi valikoituivat liimattavan kappaleen geometrian ja liimakerroksen päätygeometrian optimointi. Lisäksi työssä tarkastellaan pintakäsittelymenetelmien vaikutusta liiman ja kappaleen välisen adheesion voimakkuuteen. Mekaanisten pintakäsittelymenetelmien lisäksi käsitellään natriumhydroksidipeittausta ja hartsikäsittelyä vaihtoehtoisina menetelminä alumiinin pintakäsittelyyn. Mainittujen menetelmien lisäksi tarkastellaan myös sylinterimäisten liimaliitosten suunnitteluparametrien vaikutusta liitoksen kuormitettavuuteen.

Työn loppupuolella pohditaan esitettyjen optimointimenetelmien soveltuvuutta tarkasteltavaan käyttökohteeseen eli Formula Student Oulun M03 EVO -autoon suunniteltuihin kolmiotukivarsiin. Tukivarsien rakenne koostuu hiilikuitukomposiittisista putkista ja niihin liimattavista sylinterimäisistä alumiinisista päätyholkeista. Käsiteltyjen kirjallisuuslähteiden perusteella suunnitellulla liimaliitoksella on mahdollista saavuttaa 2,5-kertainen kuormituksenkesto suunnittelukriteerinä käytettyyn maksimikuormaan verrattuna käytettäessä työssä suositeltuja pintakäsittelymenetelmiä. Liimattavien alumiiniholkkien geometrian todetaan olevan jännitysten tasaisen liimanpinnan pituuden suuntaisen jakauman kannalta riittävän optimaalinen. Sisäkierteen ja raidetangonpään aiheuttama alumiiniholkin aksiaalisuuntaisen jäykkyyden epäjatkuvuuskohta todetaan kuitenkin mahdollisesti liitoksen kuormitettavuutta heikentäväksi piirteeksi.

*Asiasanat: alumiini, hiilikuitu, komposiitit, liimaus*

# ABSTRACT

Optimization of an adhesive joint between aluminium and carbon fiber composite

Aapo Hölsä

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 53 pp.

Supervisors at the university: Perttu Niskanen, Hannu Lahtinen

The objective of this bachelor's thesis is to investigate methods used for optimization of an adhesive joint. Special focus is placed on adhesive joints between carbon fiber composites and aluminium. The studied optimization methods were chosen via a literature review. Two of the chosen methods were adherend geometry optimization and optimization of adhesive layer free-end geometry. The effect of surface treatment on adhesive-adherend adhesion strength was also studied. Effects of sodium hydroxide etching and resin pre-coating were studied in addition to traditional mechanical surface treatments in the case of an aluminium adherend. Influence of joint geometrical parameters were studied in the case of tubular adhesive joints.

In the latter part of the thesis the application of studied methods is examined on a reference case. The case in question is a cylindrical joint between a carbon fiber composite tube and an aluminium insert in the suspension A-arms of Formula Student Oulu's M03 EVO race car. It is determined that the failure load of the designed joint should be two and a half times greater than the determined design load when using surface treatments recommended in this paper. Geometry of the designed insert is determined to be adequate for smooth stress distribution along the bond line. The threaded section of the insert and the rod end thread can cause reduced failure loads by creating a stress concentration in the discontinuity section of insert axial stiffness.

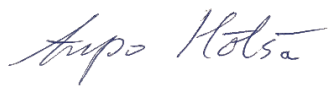
*Keywords: aluminium, carbon fiber, composites, adhesive bonding*

# ALKUSANAT

Tässä kandidaatintyössä perehdytään liimaliitosten lujuuden optimointiin kirjallisuuskatsauksen avulla. Työn aihe valikoitui, kun Formula Student Oulun uuteen M03 EVO -autoon päätettiin suunnitella hiilikuitukomposiittisesta putkesta ja alumiinisistä päätyinserteistä rakentuvat tukivarret. Hiilikuitutukivarsilla saavutetaan suuri painonsäästö vanhoihin teräksisiin tukivarsiin verrattuna. Konstruktiossa olevan rakenteellisen liimaliitoksen luotettava toteuttaminen vaatii kuitenkin erityistä tietämystä liimaliitosten teoriasta. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tuottaa perusteellinen kirjallinen katsaus liimausteoriaan tukivarsien liimaliitoksen suunnittelun ja toteutuksen taustamateriaaliksi. Työssä esiteltyä teoriaa voidaan hyödyntää myös tulevaisuudessa vastaan tulevilla rakenteellisilla liimaliitoksilla.

Haluan kiittää Formula Student Oulu ry:tä työn aiheesta. Lisäksi haluan esittää yhdistykselle kiitokseni siitä, että se tarjoaa toiminnallaan opiskelijoille mahdollisuuden osallistua haastavaan suunnitteluprojektiin jonka tulokset pääsee itse näkemään myös käytännössä. Auton suunnittelu- ja valmistusprosessi sekä vuotuisen projektin päätöksenä toimiva kilpailureissu muodostavat yhdessä ainutlaatuisen kokemuksen. Lisäksi haluan kiittää työn ohjaajia Perttu Niskasta sekä Hannu Lahtista työn kommentoinnista.

Oulu, 10.2.2021



Aapo Hölsä

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO .....	7
2 LIIMALIITOKSET .....	9
2.1 Liimaliitoksen lujuus.....	11
2.2 Liimaliitoksen kuormitettavuuden parantaminen geometrian optimoinnilla .....	13
2.2.1 Liimattavan kappaleen geometrian optimointi .....	13
2.2.2 Liimakerroksen päätygeometrian optimointi.....	20
2.3 Adheesion vaikutus liimaliitoksen kuormitettavuuteen .....	25
2.3.1 Mekaanisen karhennuksen vaikutus adheesion voimakkuuteen.....	25
2.3.2 Natriumhydroksidi- ja hartsikäsittelyn vaikutus adheesion voimakkuuteen.....	30
2.4 Liimaliitoksen lujuuden optimointi sylinterimäisessä liitoksessa.....	34
3 LIIMALIITOS TUKIVARSIEN PÄÄTYHOLKEISSA .....	42
4 YHTEENVETO .....	49
LÄHDELUETTELO	

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

$\gamma$	Pintaenergia [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_L$	Nesteen pintajännitys [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_{LV}$	Nestepinnan ja ympäröivän kaasun välinen pintajännitys [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_S$	Kiinteän aineen pintaenergia [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_{SL}$	Kiinteän aineen ja nesteen rajapintajännitys [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_{SL}$	Kiinteän aineen ja nesteen välinen rajapintajännitys [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_{SV}^0$	Kiinteän aineen ja kaasun välinen pintaenergia [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_i^-$	Pintaenergian polaarisen komponentin emäskomponentti [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_i^+$	Pintaenergian polaarisen komponentin happokomponentti [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_i^{AB}$	Pintaenergian polaarinen komponentti [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_i^D$	Pintaenergian dispersiivinen komponentti [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_i^D$	Pintaenergian polaarinen komponentti [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_i^{LW}$	Pintaenergian ei-polaarinen komponentti [J/m <sup>2</sup> ]
$\eta$	Materiaalin sitkeyskerroin
$\sigma_m$	Teoreettinen maksimikoheesioluus [MPa]
$\sigma_x$	X-akselin suuntainen normaalijännitys [MPa]
$\sigma_y$	Y-akselin suuntainen normaalijännitys [MPa]
$\tau$	Leikkausjännitys [MPa]
$\tau_{adh}$	Liimamateriaalin leikkauslujuus [MPa]
$\tau_B$	Liitoksen leikkausmurtolujuus [MPa]

$A$	Pinta-ala [mm <sup>2</sup> ]
$a$	Särön pituus [mm]
$E$	Kimmomoduuli [GPa]
$Q$	Leikkaava voima [N]
$Ra$	Pinnankarheuden aritmeettinen keskiarvo [μm]
$S_1$	Materiaalin myötölujuus x-akselin suunnassa [MPa]
$S_2$	Materiaalin myötölujuus y-akselin suunnassa [MPa]
$S_{12}$	Materiaalin leikkausmyötölujuus [MPa]
$TSAI$	Tsai-Hill-vertailuarvo
$t$	Liimakerroksen paksuus [mm]
$t_c$	Liimakerroksen kriittinen paksuus [mm]
$W$	Työ [J]
$W_a$	Kahden pinnan välinen adheesiotyö [J]
LSS	Lap shear strength, liitoksen keskimääräinen leikkauslujuus
OWRK	Owens-Wendt-Rabel-Kaelble, menetelmä pintaenergian mittaamiseen

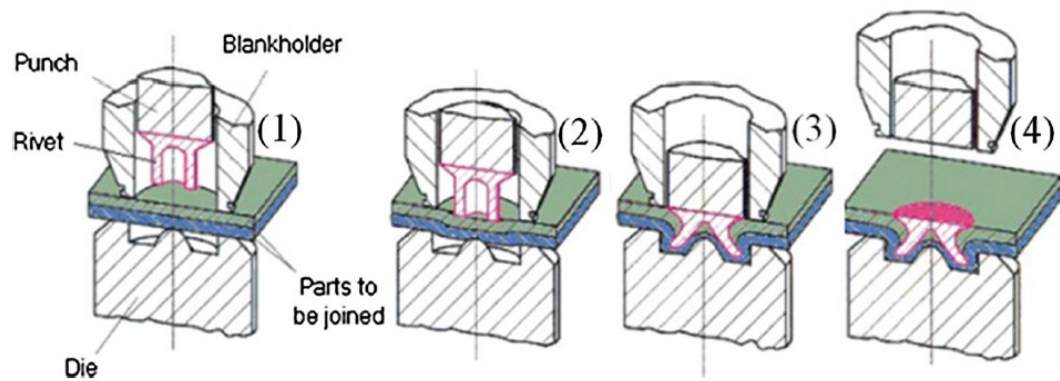
# 1 JOHDANTO

Formula Student -auton suorituskyvyn kannalta yksi tärkeimmistä suunnittelukriteereistä on mahdollisimman pieni ajoneuvon paino. Aikaisempina vuosina Formula Student Oulun autojen tukivarret on valmistettu teräksestä. Korvaamalla teräksiset tukivarret hiilikuituputken ja alumiinisten päätyinserttien yhdistelmällä on koko auton osalta saavutettavissa useamman kilon painonsäästö. Metallin ja polymeerimatriisin yhdistämisessä suurimman haasteen suunnittelulle asettaa materiaalien liitoskohta.

Liitos voidaan toteuttaa usealla eri tavalla; liimaamalla, mekaanisella liitoksella tai hitsaamalla. Komposiittilevyn ja metallin yhteen hitsaaminen perustuu muovimatriisiin sulamiseen ja uudelleenjäähmettymiseen. Hitsaaminen ei täten sovellu tarkasteltavaan käyttökohteeseen, sillä käytettävien hiilikuituputkien muovimatriisina on joko vinyyliesterihartsia tai epoksihartsia. Molemmat edellä mainitut ovat kertamuoveja, jolloin niiden sulattaminen lämmittämällä ei ole mahdollista. Sama pätee myös kitkahitsausmenetelmiin (Pramanik et al. 2017).

Komposiitin ja metallin liittäminen mekaanisesti voidaan toteuttaa niittaamalla tai ruuviliitoksen avulla. Niittäminen toteutetaan joko itsemuokkaavalla niitillä tai vetoniitin tyypillisellä rei'itettyjen pintojen läpi asennettavalla niitillä. Itsemuokkaavia niittejä käytettäessä yhdistettäviä kappaleita ei tarvitse muokata etukäteen vaan muotosulkeisuus syntyy niittausliikkeen aikana. Itsemuokkaavien niittien tulee olla lujia niitattaviin materiaaleihin verrattuna. Niitti puristetaan voimalla läpi yhdistettävistä kappaleista asennuksessa, jolloin yhdistettävien materiaalien tulee olla tukevasti vastakappaletta vasten (kuva 1) (Pramanik et al. 2017). Vastakappaleen käyttö ja erikoistyökalujen tarve rajaa pois itsemuokkaavien niittien käytön tutkittavassa käyttökohteessa. Sylinterimäisten tukivarsien geometria on haastava, sillä sisäholkin sisähalkaisija ei voi käytettävässä geometriassa olla muutamaa millimetriä suurempi.





Kuva 1. Itsemuokkaavan niittauksen toimintaperiaate (Pramanik et al. 2017).

Vetoniittejä ja ruuviliitosta käytettäessä tulee sekä komposiittiosaan että alumiiniseen vastakappaleeseen tehdä reiät ennen kappaleiden yhdistämistä. Komposiittimateriaalin poraamisessa aiheutetaan vaikeasti ennakoitavia vaurioita komposiittimateriaalin rakenteeseen reiän ympärillä muun muassa delaminaation ja yksittäisten kuitujen katkeamisen takia. Jotta poraamisessa heikentynyt kiinnitysreiän reuna ei joudu kantamaan liitoksen kuormaa tulee liitoksen puristuksen olla riittävä kitkaliitoksen aikaansaamiseksi pintojen välille. Kitkaliitoksen pettäessä kuorma siirtyy äkillisesti kiinnitysreiän reunojen kannettavaksi, jolloin se alkaa kuormitusvaihteluiden seurauksena tyssääntyä ja laajentua kuormituksen suunnassa. Mekaanista lukitusta käytetäänkin rajoitteidensa takia yleensä liimaliitoksen rinnalla lisäämään kuormankantokykyä (ns. hybridiliitos) (Pramanik et al. 2017).

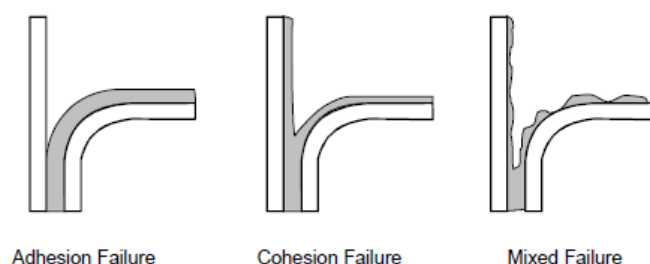
Edellä mainittujen syiden takia tässä työssä keskitytään alumiinin ja hiilikuitulujitteisen lujitemuovin väliseen liimaliitokseen. Käytännön tutkimuskohteena on hiilikuituputken ja alumiiniholkkien välinen sylinterimäinen liitos Formula Student -auton tukivarsissa. Tavoitteena työssä on selvittää materiaalien välisen liimaliitoksen lujuuteen vaikuttavat tekijät sekä selvittää keinoja liitoksen kuormitettavuuden optimoimiseksi. Lopun yhteenvedossa nostetaan esiin tarkasteltavaan käyttökohteeseen soveltuvat menetelmät onnistuneen liimauksen toteuttamiseksi.

## 2 LIIMALIITOKSET

Liimaus on prosessi, jossa kappaleita liitetään toisiinsa käyttämällä erillistä ei-metallista väliainetta. Liimaliitoksille on tyypillistä, että väliainetta eli liimaa tarvitaan hyvin pieni määrä verrattuna liitettävien kappaleiden massa. Liimat voidaan luokitella kahteen eri pääryhmään, luonnollisiin ja synteettisiin. Lisäksi liimat voidaan luokitella käyttötarkoituksen mukaan rakenteellisiin ja ei-rakenteellisiin liimoihin. Ei-rakenteellisia liimoja ovat esimerkiksi paketoinnissa käytettävät liimat. Rakenteellisen liiman määritelmänä voidaan pitää yli 7 MPa leikkauslujuutta (Ebnesajjad 2011). Nykyaikaiset rakenneliimat ovat yleensä synteettisiä elastomeerejä ja kesto- tai kertamuoveja.

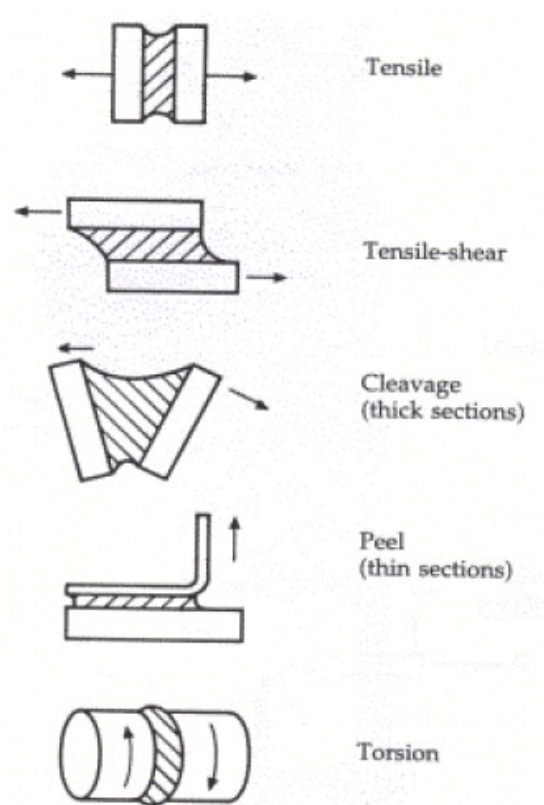
Osien välinen liimaliitos kykenee välittämään voimaa kappaleesta toiseen adheesion ja koheesion avulla. Adheesiolla tarkoitetaan liiman ja liimattavan kappaleen pinnan välistä vuorovaikutusta. Adheesio aiheutuu yhdestä tai useammasta pintojen välisiä voimia tuottavasta tekijästä; mekaanisesta lukittumisesta, kemiallisesta pintojen välisestä sidoksesta ja molekyylien välisistä dispersiovoimista (Ebnesajjad 2011). Koheesio tarkoittaa liiman sisäisiä muodonmuutoksia vastustavaa ominaisuutta, joka aiheutuu polymeeriketjujen sisäisistä kemiallisista sidoksista, polymeeriketjujen linkittymisestä toisiinsa sekä liiman molekyylien välisistä voimista.

Liimaliitoksen vaurio voidaan vaurion liimakerroksen paksuussuuntaisen esiintymistason mukaan jakaa koheesio- ja adheesiovaurioihin (kuva 2). Yleensä vauriotapahtuma on näiden yhdistelmä. Destruktiivisessa testauksessa pyritään kuitenkin koheesiovaurioon eli siihen, että vaurio tapahtuu kokonaan tai ainakin alkaa nimenomaan liimakerroksessa. Mikäli vaurio tapahtuu adheesiokerroksessa, on joko liimattavien pintojen valmistelussa tai käytettävän liiman valinnassa kehitettävää.



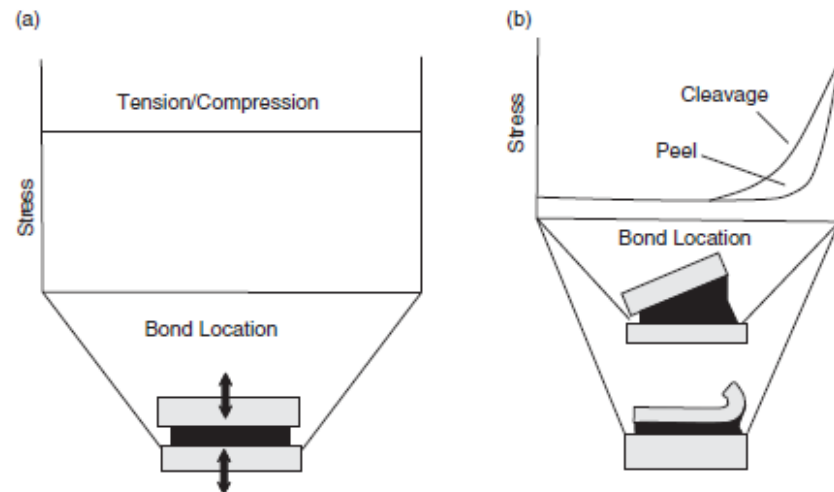
Kuva 2. Koheesio- ja adheesiovaurio liimaliitoksessa (Dorn 1994).

Liimaliitoksiin kohdistuvat kuormitukset rakenteissa voidaan jakaa neljään eri pääkuormitustyyppiin (kuva 3). Repivä, ns. peel-kuormitus muodostuu, kun ohutta liimattavaa kappaletta kuormitetaan reunastaan niin, että liimaliitoksen reuna-alueelle kohdistuu suuri, paikallinen liimapinnan normaalin suuntainen jännitys. Liitokseen kohdistuu pääosin puhdas leikkauskuormitus, kun liimattaviin kappaleisiin kohdistetaan liimapinnan tason suuntaisia voimia tai vaihtoehtoisesti vääntö liimapinnan tason normaalin suuntaisen akselin ympäri. Puhdas vetokuormitus aiheutetaan, kun jäykkiin liimattaviin kappaleisiin kohdistetaan liimapinnan normaalin suunnassa kappaleita erilleen vetäviä voimia. Raottava kuormitus aiheutuu, kun jäykkiin liimattaviin kappaleisiin kohdistetaan voima, joka pyrkii laajentamaan liimakerroksen muodostamaa kiilamaista poikkileikkausta sen toisesta reunasta.



Kuva 3. Liimaliitosten peruskuormitustyyppit (NPL Manual - Design and Testing of Bonded and Bolted Joints 2007).

Liimaliitosta suunniteltaessa on pyrittävä siihen, että liimasaumaa kuormitetaan ainoastaan leikkaus- ja puristuskuormituksella. Näissä kuormitustilanteissa sauma kestää suurimman kuormituksen. Vetäviä, repiviä ja raottavia kuormituskomponentteja tulee välttää, sillä nämä ovat liitoksen kestävyys- ja erityisesti väsymiskeston kannalta haitallisia. Repivät ja raottavat kuormitukset ovat erityisen vaarallisia; näissä kuormitustapauksissa normaalijännitys kasvaa nopeasti kuormitettavaa reunaa kohti siirryttäessä (kuva 4) (Plastics Design Library 2008).



Kuva 4. Liimasauman jännityskuvaaja veto-/puristuskuormituksessa sekä raottavassa (cleavage) että repivässä (peel) kuormituksessa (Handbook of plastics joining: A practical guide 2008).

## 2.1 Liimaliitoksen lujuus

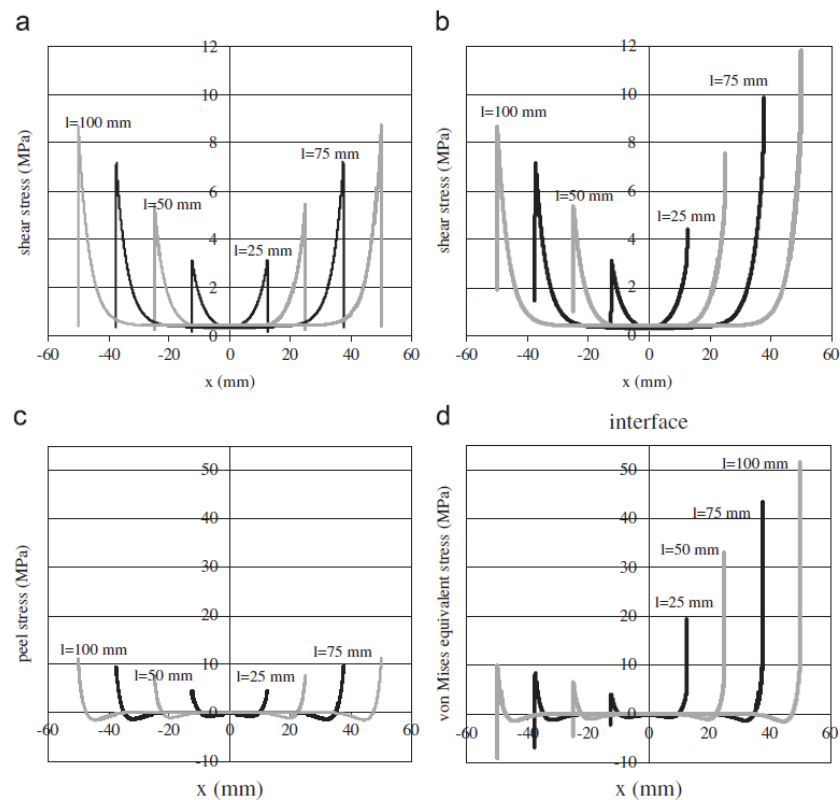
Puhtaasti leikkaavalla kuormituksella kuormitetun liimaliitoksen lujuuden esittämiseen käytetään usein laskennallista leikkausmurtolujuutta. Liitoksen leikkausmurtolujuuden arvo määritetään leikkaavan voiman ja liimapinta-alan suhteena siten, että

$$\tau_B = \frac{Q}{A}, \quad (1)$$

missä  $\tau_B$  on liitoksen leikkausmurtolujuus [MPa],  
 $Q$  on liitokseen kohdistuva leikkaava voima vauriotilanteessa [N],  
 $A$  on kappaleiden välisen liimapinnan pinta-ala [mm<sup>2</sup>].

Tämänkaltaisen laskennallisen leikkausmurtolujuuden olettaa leikkausjännityksen jakaantuvan tasaisesti koko liimapinnan pinta-alalle. Todellisuudessa liimamateriaalin ja

liimattavien kappaleiden poikkeavat mekaaniset ominaisuudet aiheuttavat epätasaisen jännitysjauman kappaleiden väliseen liimasaumaan. Cognard et al. (2010) tutkimuksessa tarkasteltiin elementtimenetelmän avulla limittäisliitosten jännitysjaumia liimattavien kappaleiden limittäin menevän osuuden pituuden muuttuessa. Leikkausjännityksen osalta tuloksissa havaitaan yhtä suuri jännityshuippu liitoksen etu- ja takareunalla liimaliitoksen keskitasossa (kuva 5a). Kun tarkastelu siirretään lähelle kuormitettavan liimatun kappaleen pintaa alkaa jännityshuippu liimaliitoksen etureunalla kasvaa (kuva 5b). Liimapinnan normaalisuuntaiselle jännitykselle saadut tulokset ovat hyvin vastaavia. Kuvassa 5c on normaalijännityksen jakauma liimakerroksen keskitasossa ja kuvassa 5d von Mises -vertailujännityksen jakauma liimatun kappaleen ja liiman liitospinnassa. Kuvan 5d perusteella voidaan todeta, että jännityshuippu kasvaa hyvin suureksi varsinkin suurella limittäispintojen pituudella ja lisää täten riskiä adheesiovauriolle kappaleen ja liiman rajapinnassa.



Kuva 5. Leikkausjännityksen (a, b), normaalijännityksen (c) ja vertailujännityksen (d) jakaumat liimasauman keskellä (a, c) sekä liiman ja liimattavan kappaleen rajapinnassa (b, d) eri liimapinnan pituuksilla  $l$  (Cognard et al. 2010).

## 2.2 Liimaliitoksen kuormitettavuuden parantaminen geometrian optimoinnilla

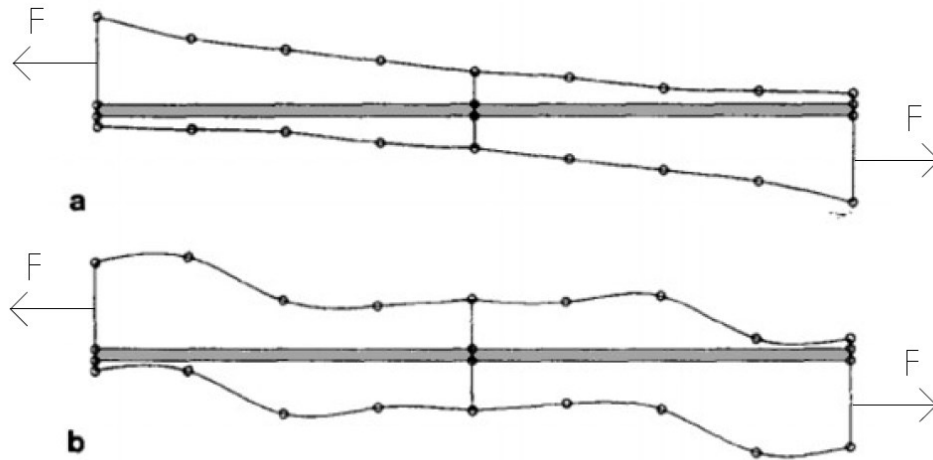
Liimapinnan reunassa esiintyvät jännityshuiput altistavat liimapinnan reunan adheesio- ja koheesioauriolle ennen kuin liitoksen keskimääräinen leikkausjännitys kasvaa liimamateriaalin leikkausmurtolujuuden tasolle. Jännityshuippujen aiheuttaman liitoksen ennen aikaisen pettämisen ehkäisemiseksi tutkimuksissa on pyritty selvittämään keinoja, joilla liimaliitoksen reunojen jännityshuippuja saadaan pienennettyä ja liitoksen vauriokuormaa kasvatettua. Tässä luvussa perehdytään liimattaville kappaleille suoritettun geometrian optimoinnin sekä liimakerroksen vapaiden päätyjen geometrian optimoinnin vaikutukseen liimakerroksen jännitysjakauman kannalta.

### 2.2.1 Liimattavan kappaleen geometrian optimointi

Groth & Nordlund (1991) käyttivät tutkimuksessaan elementtimenetelmään pohjautuvaa tietokoneoptimointia liimattavien kappaleiden poikkileikkauksen optimointiin. Tutkimuksessa tarkasteltiin epoksi- ja polyuretaaniliimalla liimattuja alumiini-alumiini ja teräs-teräs-materiaalipareja. Optimointi-iteraatioissa muuttujaksi oli määrätty liimattavan kappaleen paksuus eri pisteissä limiliitoksen kohdalla. Tavoitteeksi oli määrätty mahdollisimman pieni Tsai-Hill-vertailuarvo. Tapauksesta riippuen optimoinnissa käytettiin joko täyttä tai leikkauspainotettua vertailuarvoa. Leikkauspainotetun vertailuarvon saamiseksi liimamateriaalin myötölujuudet 1- ja 2-suunnassa kasvatettiin hyvin suuriksi. Laskennassa käytetyt kuormitustilanteet olivat staattisia kuormituksia.

Yksinkertaisen limiliitoksen optimoinnissa tavoitteena käytettiin Tsai-Hill-vertailuarvon minimoimista. Laskennassa käytetty kuormitus oli 322.58 N, liimapinnan pituus 12.7 mm ja leveys 25.4 mm. Tällöin laskennallinen keskimääräinen leikkausjännitys liimakerroksessa saa arvon 1 MPa. Laskenta-ajan lyhentämiseksi pitkittäissuuntaisen poikkileikkauksen lähtögeometriaksi oli määritetty lineaarisesti kappaleen reunaa kohti oheneva ramppi. Kuvassa 6 on esitettynä lähtögeometria (a) sekä 15 iteraation jälkeen saatu geometria (b). Vertailuarvon maksimi liitoksessa pieneni optimoinnin tuloksena luvusta 4.61 lukuun 3.4. Liitoksen kuormitettavuuden kannalta tämä tarkoittaa 33 % parannusta (Groth & Nordlund 1991). Raportissa huomautetaan, että yksinkertaisessa limiliitoksessa saatuihin tuloksiin tulee suhtautua varauksella. Tapaus on todellisuudessa geometrisesti epälineaarinen johtuen siitä, että kuormitusvektori sijaitsee eri tasossa kuin kiinnitetyn kappaleen tuenta. Tällöin liimattaviin kappaleisiin syntyy taivuttava momentti

ja taipumasta riippuen osa liimakerroksen leikkauskuormituksesta muuttuu normaalisuuntaiseksi kuormitukseksi.



Kuva 6. Yksinkertaisen limiliitoksen optimoinnin lähtögeometria (a) sekä 15 iteraation kautta saavutettu optimoitu geometria (b). Kuvaan merkitty kuormitusvektorit ja liimakerros korostettu harmaalla (mukaillen Groth & Nordlund 1991).

Kaksoislimiliitoksessa vastaavaa geometrista epälineaarisuutta ei esiinny yhtä suurissa määrin, sillä liitoksen paksuussuuntainen symmetrisuus rajoittaa taipumaa liimattavissa kappaleissa, jolloin kiertymä liimaliitoksen kohdalla on rajallista. Kaksoislimiliitoksen optimointi suoritettiin sekä leikkauspainotettua että täyttä Tsai-Hill-vertailuarvoa optimointikriteerinä käyttäen. Leikkauspainotettu Tsai-Hill vertailuarvo saadaan, kun vertailuarvon yhtälöön

$$TSAI = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{S_2}\right)^2 - \frac{\sigma_x \sigma_y}{S_1^2} + \left(\frac{\tau}{S_{12}}\right)^2}, \quad (2)$$

missä  $TSAI$  on vertailuarvon suuruus,

$\sigma_x$  on x-akselin suuntainen normaalijännitys [MPa],

$S_1$  on materiaalin myötölujuus x-akselin suunnassa [MPa],

$\sigma_y$  on y-akselin suuntainen normaalijännitys [MPa],

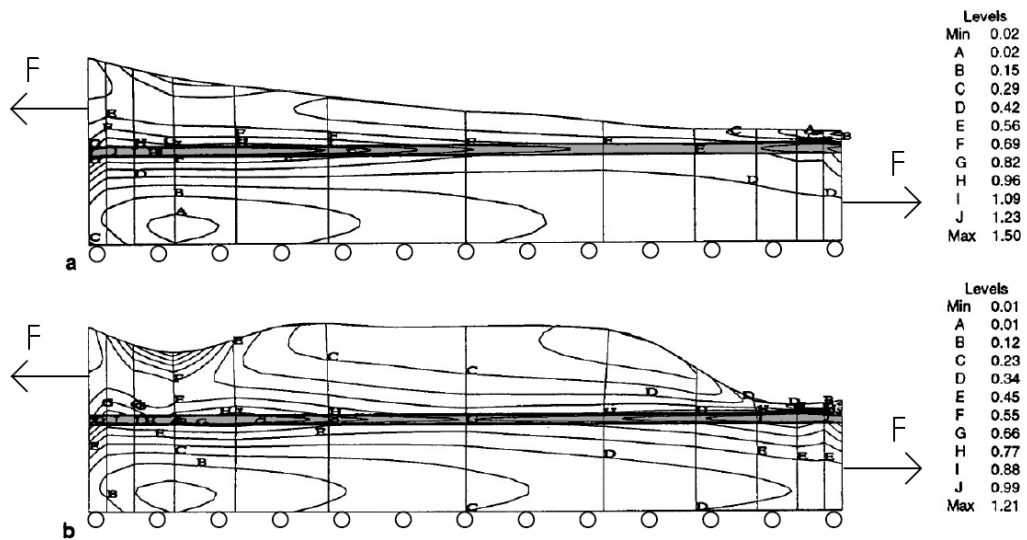
$S_2$  on materiaalin myötölujuus y-akselin suunnassa [MPa],

$\tau$  on leikkausjännitys [MPa]

ja  $S_{12}$  on materiaalin leikkausmyötölujuus [MPa],

määritetään myötölujuuksien  $S_1$  ja  $S_2$  arvot erittäin suuriksi todellisiin materiaaliominaisuuksiin verrattuna. Tämän seurauksena näitä suureita sisältävät x- ja y-

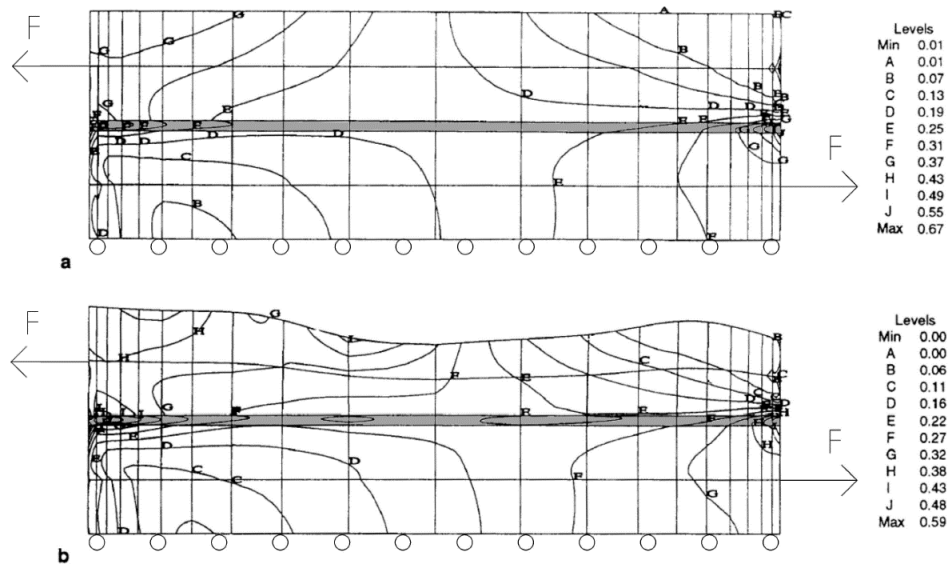
suuntaiset jännitykset huomioivat termit jäävät suuruuksiltaan merkityksettömän pieniksi, jolloin leikkausjännitykset huomioiva termi määrää lähes yksinomaan vertailuluvun suuruuden (Groth & Nordlund 1991). Leikkauspainotettua Tsai-Hill-vertailuarvoa optimointikriteerinä käyttäen saatiin tutkimuksessa aikaan 23 % vertailuarvon lasku ja 30 % kuormankantokyvyn kasvu. Lähtögeometria sekä optimoinnin tuloksena saatu geometria on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Kaksoislimiliitoksen optimoinnin lähtögeometria (a) sekä 15 iteraation kautta saavutettu leikkausjännityksen perusteella optimoitu geometria (b). Liimakerros korostettu kuvassa harmaalla ja kuvaan lisätty kuormitusvektorit sekä kaksoislimiliitoksen symmetriasta aiheutuva tuenta (mukaillen Groth & Nordlund 1991).

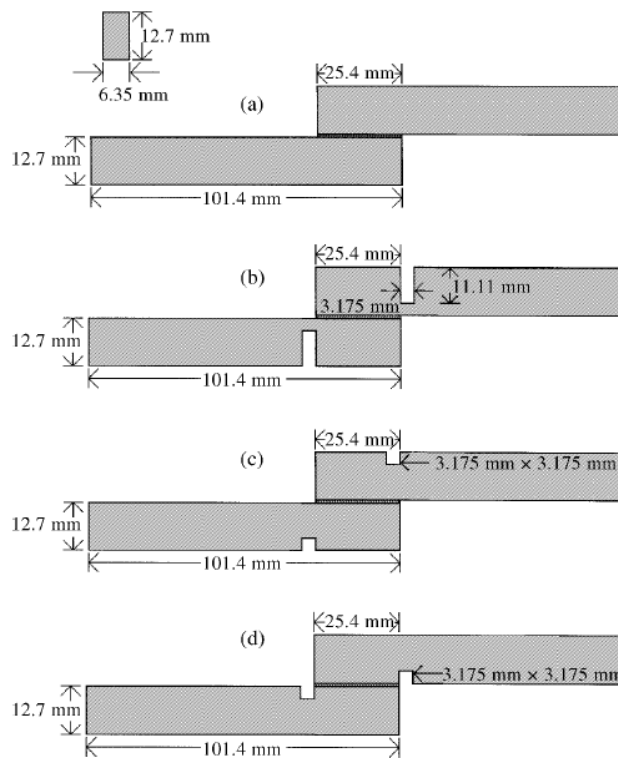
Kun optimointi suoritettiin täyttä vertailuarvoa kriteerinä käyttäen, saatiin vastaaviksi arvoiksi 11 % ja 12 % (Groth & Nordlund 1991). Täyttä Tsai-Hill-vertailuarvoa optimointikriteerinä käyttäneen laskennan lähtögeometria sekä optimoinnin tuloksena saatu geometria kuvassa 8.





Kuva 8. Kaksoislimiliitoksen optimoinnin lähtögeometria (a) sekä 15 iteraation kautta saavutettu täyden Tsai-Hill vertailuarvon perusteella optimoitu geometria (b). Liimakerros korostettu harmaalla ja kuvaan lisätty kuormitusvektorit sekä kaksoislimiliitoksen symmetriasta aiheutuva tuenta (mukailten Groth & Nordlund 1991).

Sancaktar & Simmons (2000) tutkivat lovien lisäämistä liimattaviin kappaleisiin lähelle liimakerroksen jännityshuippujen sijaintia. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää paikallisesti joustavammaksi tehdyn liimattavan kappaleen vaikutusta liimakerroksen jännityksiin. Koegeometrioiden jännitykset ja vauriokuormat vetokuormituksessa laskettiin elementtimenetelmää käyttäen ja laskennan tulokset varmennettiin käytännön kokeilla. Tutkimuksessa käytetyt koekappaleiden geometriat on esitetty kuvassa 9. Tutkimuksen koeliitokset valmistettiin käyttämällä kolmea eri liimamateriaalia; epoksiliimakalvoa eli nylonkankaaseen imeytettyä epoksiliimaa, kaksikomponenttista metallipartikkeleilla vahvistettua epoksiliimaa sekä joustavaksi kovettuvaa yksikomponenttista liimaa.



Kuva 9. Tutkimuksessa käytetyt lovetut liimattavien kappaleiden geometriat (Sancaktar & Simmons 2000).

Tutkimuksessa huomattiin, että epoksiliimakalvoa käytettäessä kuvan 9 tapauksen (d) mukaisella liimapinnan viereen tulevalla lovella on suuri vaikutus liiman ja kappaleen rajapinnan maksimipääjännityksen arvoon. Lisäksi jännityshuipun sijainnin havaittiin siirtyvän liimapinnan reunasta kesemmälle, jolloin liimaliitoksen kuormitettavuuden voidaan olettaa kasvavan. Normaalisuuntaisen kuormitushuipun havaittiin pienenevän enemmän kuin vastaavankokoisella yläpinnan lovella. Eri loveamisvaihtoehdoilla ei havaittu olevan suurta vaikutusta leikkausjännityksen huippu- tai keskiarvoihin (Sancaktar & Simmons 2000).

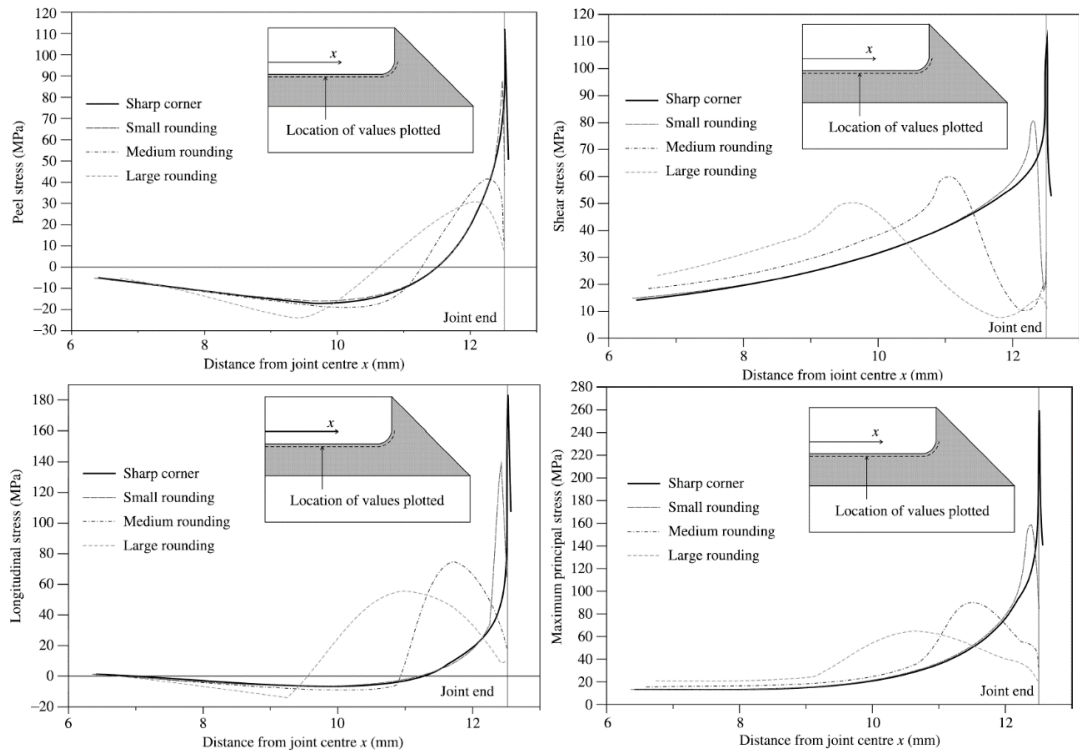
Metallipartikkeleilla varustetun epoksin materiaaliarvoilla saatiin parhaat laskennalliset tulokset syvällä yläpuolisella lovella (kuva 9, tapaus (b)). Tässä tapauksessa maksimipääjännityksen ja kuormitukseen nähden poikittaissuuntaisten jännitysten pieneneminen ei ollut yhtä merkittävää kuin liimakalvon tapauksessa. Jännityshuippujen siirtyminen kesemmäs liimasauman reunalta oli kuitenkin havaittavissa myös näissä tuloksissa. Loveamatonta geometriaa käytettäessä liimakerroksen normaalijännityksen huippuarvo oli 1,27-kertainen lovettuun geometriaan verrattuna (Sancaktar & Simmons 2000).

Tutkimuksessa löydettiin vastaavuuksia verrattaessa laskennan tuloksia vetokokeiden tuloksiin. Metallipartikkeliepoksiliitoksen kuormitettavuus kasvoi yläpuolisen syvän loven lisäyksen jälkeen lähes tarkalleen laskennallisen normaalijännityksen huipun pienenemisen verran (29 %). Sitkostamaton 2-komponenttinen liima on vauriokäyttäytymiseltään haurasta ja tämäntyyppiset liimat ovat erityisen herkkiä repivälle kuormitukselle. Epoksikalvolla liimatuissa koekappaleissa ei havaittu samankaltaista selvää vastaavuutta. Tämä selittynee sillä, että laskennassa ei huomioitu liimamateriaalin sitkostausta ja nylonkankaan vaikutusta. Joustavaksi kovettuvalla liimalla liimatuissa koekappaleissa liitoksen kuormitettavuuden kehitys seurasi puolestaan leikkausjännityksen huippu- ja keskiarvojen laskennallista kehitystä, jolloin loveamisella saavutettu kuormituksenkeston kasvu jäi merkityksettömän suureksi. Tämänkaltaisen sitkeän liiman vaurion aiheuttaakin tutkijoiden mukaan pääsääntöisesti leikkausjännitys. Poikittaissuuntaisen jännitysten ja maksimipääjännityksen muutoksilla ei ollut havaittavaa yhteneväisyyttä liitosten kuormankantokyvyn kasvulle. Tulokset vastaavat raportin mukaan muita aiheesta tehtyjä tutkimuksia, joissa keskitytään normaalijännitykseen ja leikkausjännitykseen liimaliitoksen vaurion aiheuttajina (Sancaktar & Simmons 2000).

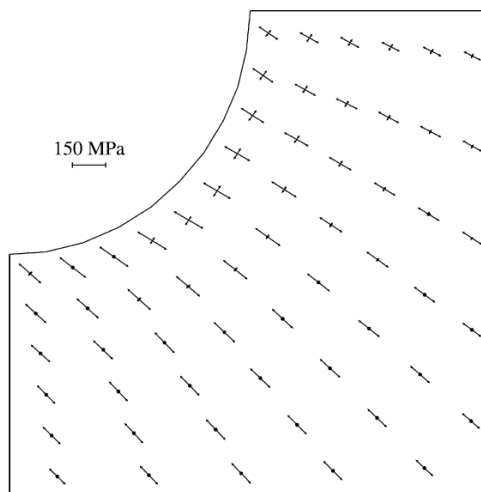
Zhao et al. (2011) perehtyivät tutkimuksessaan liimattavan kappaleen päätysärmän pyöristyksen vaikutukseen liimakerroksen jännitys jakaumaan. Elementtimenetelmän avulla tutkimuksessa analysoitiin alumiinikappaleiden välistä yksinkertaista limittäisliitosta. Laskennassa käytettiin liimamateriaalille kaksikomponenttiepoxsin materiaaliarvoja. Lisäksi vertailun vuoksi laskenta suoritettiin myös vastaavan nitriliikumilla sitkostetun epoxsin arvoja käyttäen. Vertailtavia nurkkageometrioita oli neljä kappaletta; terävä nurkka sekä 0,25, 1,6 ja 3,2 mm säteellä olevat nurkat.

Sitkostamattomalla epoksiliimalla liimatussa liitoksessa käytettiin materiaalimallina lineaariselastista mallia. Laskennassa käytettiin kuormana 20 kN kuormaa alemman liimattavan kappaleen oikeaan päättyyn kohdistettuna. Tuloksista otettiin kuvaajat jännitys jakaumalle ylemmän liimattavan kappaleen ja liiman rajapinnasta nurkkapyöristyksen läheisyydestä. Tarkasteltavat jännitykset olivat liimapinnan normaalin suuntainen jännitys, leikkausjännitys, kuormituksen suuntainen jännitys sekä maksimipääjännitys. Laskennan tuloksista (kuva 10) nähdään, että jännityshuiput madaltuvat ja levittyvät laajemmalle pinta-alalle nurkkapyöristyksen säteen kasvaessa. Lisäksi on huomattavissa jännityshuippujen siirtyminen reunalta kohti liitoksen

keskipistettä. Liitoksen kuormitettavuus ei välttämättä kuitenkaan parane samassa suhteessa jännityshuippujen laskun kanssa. Maksimipääjännityksen suunta nurkan kohdalla on n. 45 asteen suunnassa oikealle alaviistoon. Pyöristykseen sädetä kasvatettaessa yhä suurempi osuus pääjännitysvektoreista on lähes pinnan normaalin suuntaisia tai hyvin lähellä sitä (kuva 11). Näin ollen adheesioon kannalta kriittinen kuormitus osuu yhä suuremmalle matkalle liitettävän kappaleen pinnasta. (Zhao et al. 2011).

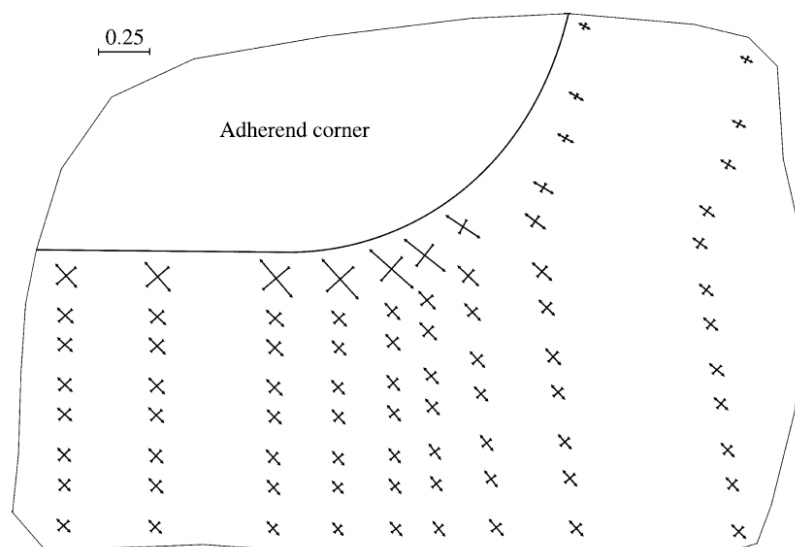


Kuva 10. Eri nurkkapyöristysgeometrioilla saavutetut jännitysjaumat nurkan läheisyydessä (Zhao et al. 2011).



Kuva 11. Pääjännitysvektorit nurkkapyöristyksessä hauraalla epoksiliimalla liimatussa limiliitoksessa (Zhao et al. 2011).

Sitkostatulla epoksille käytettiin laskennassa elastisplastista materiaalmallia. Kuormitus oli määritelty edeltävän tapauksen mukaisesti 20 kN vetokuormaksi alemman liimattavan kappaleen oikeaan pätyyn. Saaduista laskennan tuloksista otettiin kuvaajat muodonmuutosenergiatiheyden jakaumalle nurkan läheisyydessä. Teoriassa maksimiarvon pitäisi terävällä nurkalla kasvaa äärettömäksi mutta johtuen elementtiverkon rajallisesta tiheydestä saa huippuarvo jonkin nimellisen maksimiarvon tuloksia tarkastellessa. Tuloksista huomataan, että pyöristyksen kasvaessa muodonmuutosenergiatiheyden huippuarvo pienenee ja se siirtyy kohti liimapinnan keskipistettä. Päävenymien tarkastelusta (kuva 12) huomataan, että nurkan kohdalla päävenymävektori on pyöristyksen säteen kasvaessa yhä pidemmältä matkalta pinnan normaalin suuntainen. Kuten elastisen liimamateriaalin tuloksia analysoitaessa todettiin, voi näin ollen kasvu liitoksen kuormitettavuudessa pyöristyksen säteen suurentuessa olla suhteessa pienempi kuin muodonmuutosenergiatiheyden huippuarvojen lasku (Zhao et al. 2011).



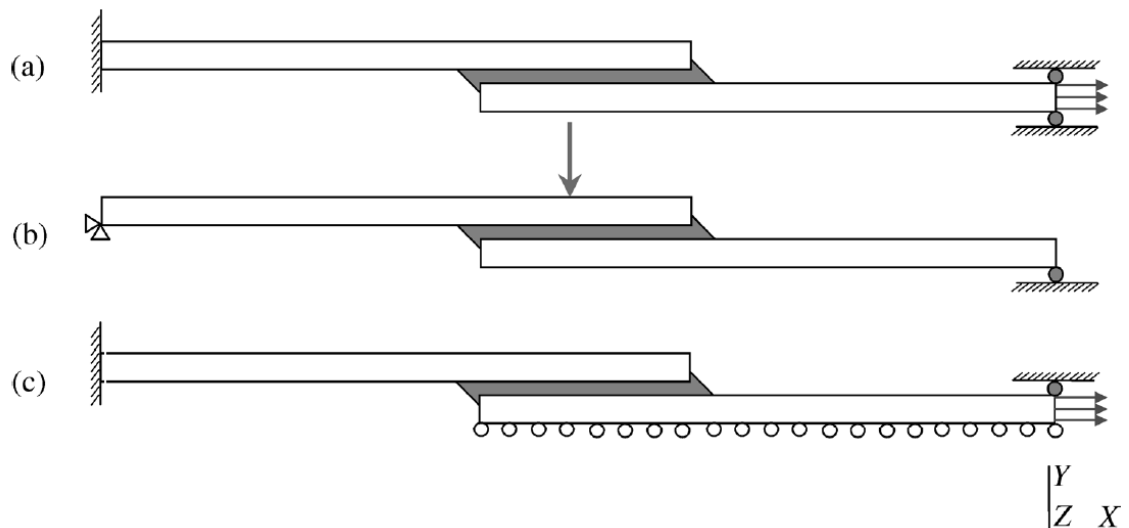
Kuva 12. Päävenymävektorit nurkkapyöristyksessä sitkostatulla epoksiliimalla liimatussa limiliitoksessa (Zhao et al. 2011).

### 2.2.2 Liimakerroksen päätygeometrian optimointi

Apalak & Engin (2004) tutkivat liimakerroksen vapaiden pätyjen geometrian vaikutusta vaurion alkamiseen yksi- ja kaksikerroksisissa limittäisliitoksissa. Tutkimuskohteena oli yksinkertainen sekä kaksinkertainen limiliitos. Liitettävät kappaleet olivat alumiinia ja käytetty liima kaksikomponenttinen epoksiliima. Liitoksen vauriomekaniikkaa pyrittiin laskennalla selvittämään ns. vaurioituneen alueen mallilla. Mallissa pyritään

jäljittämään särön etenemistä laskennan kannalta tehokkaalla tavalla. Kun laskennassa käytetyn elementin kaikkien Gaussin pisteiden paikallinen venymä ylittää murtovenymän luokitellaan kyseinen elementti vaurioituneeksi alueeksi. Näiden vaurioituneiden alueiden jäykkyys määritellään seuraavaa laskennan vaihetta varten nimellisen pieneksi. Vaurion ydintymispisteen ja etenemisen tarkastelemiseksi tulee elementtiverkon olla määritelty riittävän tarkaksi (Apalak & Engin 2004).

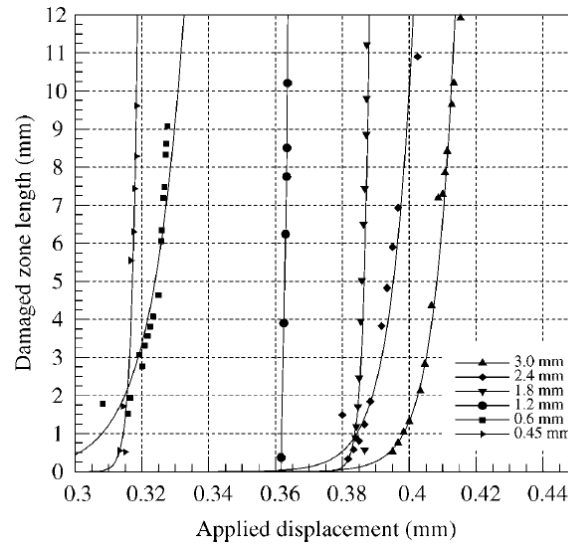
Tutkimuksessa suoritettiin laskenta yksin- ja kaksinkertaiselle limiliitokselle liimakerroksen päätypyöristyksen pituuksilla 0,45, 0,6, 1,2, 1,8, 2,4 ja 3,0 mm. Laskennan geometriassa on lisätty 0,01 mm säteinen pyöristys liimattavien kappaleiden liimakerroksen sisään jääviin nurkkiin singulariteettien välttämiseksi (Apalak & Engin 2004). Laskennassa ja käytännön kokeissa käytetyt kuormitustapaukset liikerajoitteineen on esitetty kuvassa 13.



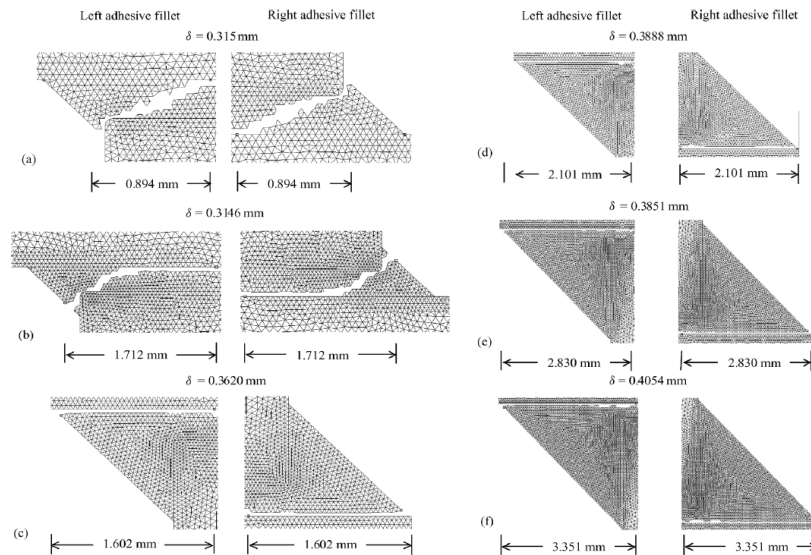
Kuva 13. Tutkimuksessa käytetyt laskennan kuormitustapaukset liikerajoitteineen (Apalak & Engin 2004).

Yksinkertaisen limiliitoksen laskennan tuloksena saatiin kaksi erilaista vaurion etenemispolkua. 0,45 ja 0,60 mm pitkällä pyöristyksellä vika ydintyi liimapinnan sisään jäävään pyöristettyyn liimattavan kappaleen nurkkaan sekä liimakerroksen etu- että takareunassa tarkasteltaessa liitosta x-akselin suunnassa. Nurkasta vaurio lähti etenemään kohti liiman vapaata pintaa. Samanaikaisesti vaurio lähti etenemään keskemmas liimakerrosta ja kohti toisen liimattavan kappaleen ja liimakerroksen rajapintaa, ts. ylemmän kappaleen nurkasta kohti alemman kappaleen rajapintaa liimakerroksen paksuuden läpi ja päinvastoin. Pidemmillä pyöristyksillä (1,2–3,0 mm) vaurion ydintyminen tapahtui liimapyöristyksen vapaan pinnan ja liimattavan kappaleen

vaakasuoran pinnan saumassa. Vaurion eteneminen tapahtui yhteen suuntaan liiman ja kappaleen rajapintaa pitkin. Kuvassa 14 on esitettyä koekappaleen pakkosiirtymän suhde syntyneen vauriosärön pituuteen eri nurkkapyöristysten pituuksilla. Laskennan tuloksena saadut vaurion etenemispolut eri pyöristysten pituuksilla kuvassa 15.

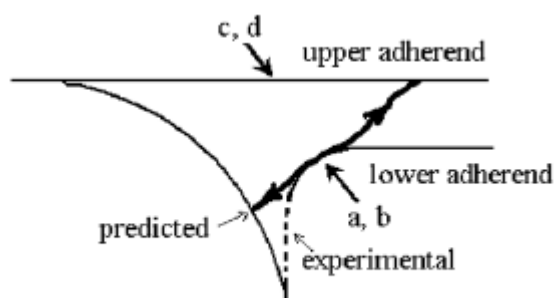


Kuva 14. Pakkosiirtymän ja liimasaumaan syntyneen särön pituuden suhde eri nurkkapyöristysten pituuksilla yksinkertaisessa limiliitoksessa vetokuormituksessa (Apalak & Engin 2004).



Kuva 15. Yksinkertaisen limiliitoksen laskennan tuloksena saadut vaurion etenemispolut eri pyöristysten pituuksilla ((a) 0,45 mm, (b) 0,60 mm, (c) 1,2 mm, (d) 1,8 mm, (e) 2,4 mm, (f) 3,0 mm) (Apalak & Engin 2004).

Koesarjan tuloksissa huomataan oleellisia eroja laskennan tuloksiin. Koeliitoksissa kaikilla liimakerroksen pyöristysten pituuksilla vaurio ydintyy ensin pyöristysten sisällä olevaan liitettävän kappaleen nurkkaan kuten laskennassa tapahtui lyhyillä, 0,45 ja 0,6 mm pyöristyksillä. Vaurio etenee nurkasta kohti toisen kappaleen ja liiman rajapintaa laskennan tuloksien mukaisesti. Laskennasta poiketen vaurio ei etene toisessa suunnassa suoraan lyhintä reittiä liimapyöristysten vapaaseen pintaan vaan nousee liiman ja kappaleen rajapintaa pitkin pyöristysten vapaan pinnan ja kappaleen päädyn rajalle (kuva 16). Raportissa esitetään laskennan eroava pyöristysten geometria mahdolliseksi syyksi eroavuuksiin. Verkotuksen yksinkertaistamiseksi pyöristys on laskentamallissa oletettu poikkileikkaukseltaan suorasivuiseksi viisteeksi, kun todellisuudessa liiman kovettumisen jälkeen pyöristyksestä tulee poikkileikkaukseltaan kovera (Apalak & Engin 2004).

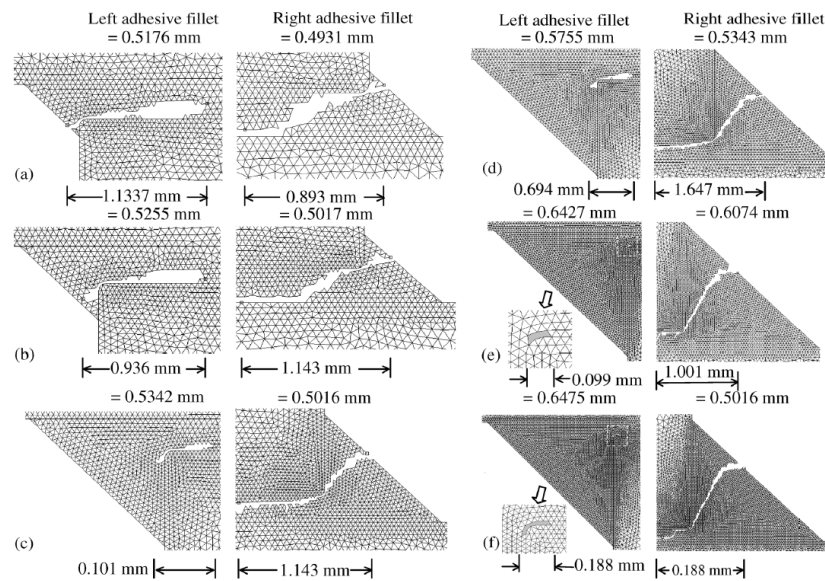


Kuva 16. Vaurion eteneminen laskentamallissa (predicted) sekä koesarjassa (experimental) (Apalak & Engin 2004).

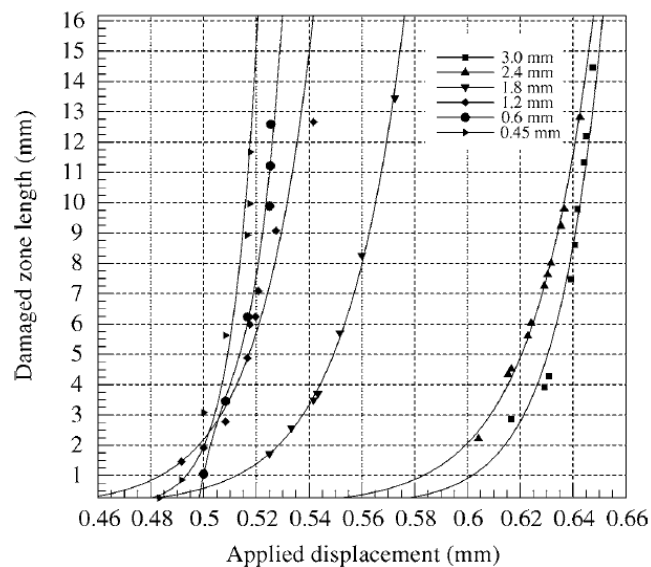
Kaksoislimiliitoksen laskennan tulokset poikkeavat osin aikaisemmasta. Vaurio ydintyy laskennassa liimattavien kappaleiden pyöristetyissä nurkissa jokaisella pyöristysten pituudella. Vaurio etenee nurkasta kohti liimapyöristysten vapaata pintaa kuvan 16 mukaista ennustettua polkua pitkin. Samalla vaurio etenee toiseen suuntaan viistosti kohti toisen liimattavan kappaleen pintaa oikeanpuoleisissa liimakerroksen päädyissä (kuva 17). Vaurion kasvulle pakkosiirtymämatkan funktiona saatiin vastaavanlaiset kuvaajat kuin yksinkertaisen limiliitoksen tapauksessa (kuva 18). Vasemmanpuoleisissa päädyissä ydintyminen tapahtuu myös pyöristysten sisällä olevassa kappaleen nurkassa ja vaurio etenee yhtä lailla pyöristysten vapaata pintaa kohti. Toiseen suuntaan vaurio etenee kuitenkin pitkin liiman ja kappaleen rajapintaa vaihtamatta puolta. Huomionarvoista on, että kaksoislimiliitoksen tapauksessa vasemman päädyn vaurion ydintyminen tapahtuu vasta kuormituksen kasvatuksen loppuvaiheessa. Raportin mukaan ero selittyy sillä, että epoksiliima kestää puristuskuormaa n. 3,2 kertaa paremmin kuin vetokuormitusta.



Liitoksen vasempaan pätyyn kohdistuu tilanteessa puristuskuorma, kun oikeaan pätyyn kohdistuu vetokuormitus. Tuloksissa huomattiin myös, että liimakerroksen pyöristysten pituuden kasvaessa liimakerroksen vasemman päädyn vaurio ydintyi suuremmalla poikkeusmatkalla ja syntyneen vaurion koko jäi pienemmäksi. Koesarjan vetokokeista saadut tulokset vastasivat vaurion ydintymisen ja etenemisen osalta laskennan tuloksia. On huomioitava, että lyhyemmän kuin 1,2 mm pitkän pyöristyksen valmistaminen käytännössä on hyvin haastavaa ja näin koetulokset eivät välttämättä ole käyttökelpoisia alle 1,2 mm pyöristyksen vauriokäyttäytymisen ennustamisessa (Apalak & Engin 2004).



Kuva 17. Vaurion etenemispolku eri nurkkapyöristyksen pituuksilla kaksoislimiliitoksessa vetokuormituksessa (Apalak & Engin 2004).



Kuva 18. Pakkosiirtymän ja liimasaumaan syntyneen särön pituuden suhde eri nurkkapyöristyksen pituuksilla kaksoislimiliitoksessa vetokuormituksessa (Apalak & Engin 2004).

## 2.3 Adheesion vaikutus liimaliitoksen kuormitettavuuteen

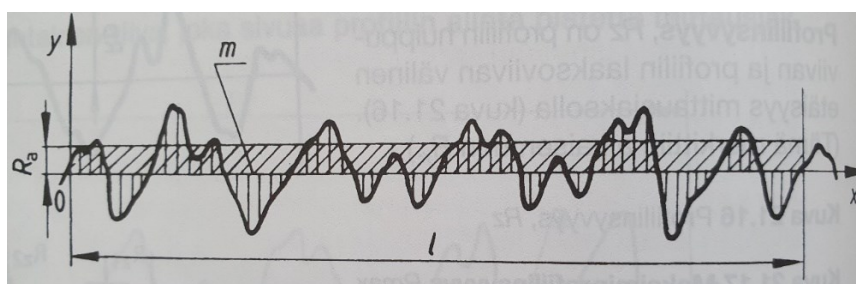
Aikaisemmin listatut menetelmät tähtäävät liitoksen kuormitettavuuden kasvattamiseen liimakerroksen reunojen jännityshuippuja pienentämällä. Todellisessa kuormitustilanteessa liimaliitoksen vaurio ydintyy useimmiten liimakerroksen reunassa liimakerroksen ja liimattavan kappaleen välisessä adheesiorajapinnassa. Adheesiovaurio voi huonon liimattavan kappaleen valmistelun takia aiheutua merkittävästi pienemmällä kuormalla kuin laskennallisesti on ennustettu. Adheesion voimakkuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä liimattavien kappaleiden pintakäsittelyn vaikutusta liitoksen adheesiolujuuteen on käsitelty seuraavissa kappaleissa.

### 2.3.1 Mekaanisen karhennuksen vaikutus adheesion voimakkuuteen

Kwon et al. (2019) tutkimuksen tavoitteena oli selvittää alumiinikappaleen pinnankarheuden Ra-luvun vaikutus adheesion voimakkuuteen alumiinin ja hiilikuidun välisessä liimaliitoksessa. Ra-luku määritetään ottamalla keskiarvo pinnan pisteiden poikkeamista pinnan keskiviivasta määritellyllä mittausjaksolla (kuva 19). Määrittäminen tapahtuu yhtälöllä (Pere 2012)

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \quad (3)$$

missä  $l$  on mittausjakson pituus,  
 $y(x)$  on pinnan pisteen korkeuskoordinaatti pituuden funktiona.



Kuva 19. Profiilin Ra-luvun määrittäminen (Pere 2012).

Eri pinnanlaatuja saavuttamiseksi alumiinikoekappaleita hiottiin kolmella eri karkuisella hiomapaperilla; P120, P220, ja P400. Kaikilla kolmella eri karkeudella hiottiin koekappaleita hioma-ajoilla 30, 60 ja 180 sekuntia, sillä hiomapaperin karkeuden vaikutuksen lisäksi tutkimuksissa haluttiin selvittää hioma-ajan vaikutus pinnankarheuteen ja adheesiovoimakkuuteen. Hiomapaperin P-luku määrittää

hiomapaperin hiomapartikkelien keskimääräisen halkaisijan. Partikkelien keskihalkaisijan kasvaessa P-luku pienenee. P220 ja isompirakeisissa karkeuksissa keskihalkaisija määritetään FEPA-Standardin 43-1:2006 mukaisesti seulomalla. P240 ja hienommissa karkeuksissa käytetään FEPA-Standardin 43-2:2006 mukaista sedimentaation perustuvaa raekoon määritystä (Federation of European Producers of Abrasives).

Materiaalien välisen adheesion voimakkuutta voidaan ennustaa määrittämällä pintojen välinen adheesiotyö materiaalien pintaenergioiden perusteella. Nesteillä aineelle ominainen pintaenergian suuruus on helposti mitattavissa, sillä niissä pintaenergia esiintyy pintajännityksenä. Pintajännityksen suuruus nesteessä on suoraan pintaenergian määrä pinta-alayksikköä kohden (Ebnesajjad & Ebnesajjad 2014). Näin ollen pintaenergiatiheys voidaan määrittää yhtälöllä

$$\gamma = \frac{W}{dA}, \quad (4)$$

missä  $\gamma$  on nesteen pintaenergiatiheys (pintajännitys) [ $\text{J}/\text{m}^2$ ],  
 $W$  on nestepintaan kohdistettu muodonmuutostyö [ $\text{J}$ ],  
 $dA$  on työllä aiheutettu nestepinnan pinta-alan muutos [ $\text{m}^2$ ].

Kiinteälle aineelle pintaenergiatiheyden määrittäminen ei onnistu samalla tavalla kuin nesteelle. Aineen pintaan kohdistettu muodonmuutostyö lisää pintaenergian määrää mutta osa työstä sitoutuu palautuvaksi tai palautumattomaksi energiaksi aineen sisäosiin kappaleen tilavuuden muuttuessa. Young esitteli vuonna 1805 yhtälön

$$\gamma_{LV} \cos\theta = \gamma_{SV}^0 - \gamma_{SL}, \quad (5)$$

missä  $\gamma_{LV}$  on nestepinnan ja ympäröivän kaasun välinen pintajännitys [ $\text{J}/\text{m}^2$ ],  
 $\gamma_{SV}^0$  on kiinteän aineen ja kaasun välinen pintaenergiatiheys [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]  
ja  $\gamma_{SL}$  on kiinteän aineen ja nesteen välinen rajapintajännitys [ $\text{J}/\text{m}^2$ ].

Yhtälön avulla pintaenergiatiheydet saadaan kytkettyä kiinteälle aineelle asetetun nestepisaran muodostamaan kontaktikulmaan. Kontaktikulmakokeessa kiinteän aineen kappaleelle tiputetaan pisara nestettä, jonka pintaenergiatiheys eli pintajännitys on tiedetty. Pisaran vapaan pinnan ja kappaleen pinnan välinen kulma muodostaa

kontaktikulman (contact angle, CA). Nesteen ja kiinteän aineen pintojen välinen vetovoima eli adheesiotyö  $W_a$  määritetään kaavalla (Ebnesajjad & Ebnesajjad 2014)

$$W_a = \gamma_{LV} + \gamma_{SV}^0 - \gamma_{SL}. \quad (6)$$

Kun sijoitetaan Youngin yhtälön (5) vasen puoli adheesiotyö kaavaan (6) saadaan pintojen väliselle adheesiotyölle yhtälö

$$W_a = \gamma_{LV} (1 + \cos\theta), \quad (7)$$

joka tunnetaan Young-Dupre-yhtälönä. Yhtälön avulla nesteen ja kiinteän aineen välinen adheesiotyö on mahdollista määrittää mittaamalla nesteen pintajännitys ympäröivässä kaasussa sekä kiinteän aineen pinnalle tiputetun nestepisaran kontaktikulma.

Kwon et al. (2019) tutkimuksessa on haluttu määrittää pintaenergian arvo eri hiomamenetelmillä käsitellyille alumiinikoepaloille. Kontaktikulman ja mittauksessa käytetyn nesteen pintajännityksen mittaamisen jälkeen on Youngin yhtälössä edelleen jäljellä kaksi tuntematonta. Tutkimuksessa pintaenergian määrittämiseen käytettiin van Ossin menetelmää. Menetelmä perustuu oletukseen, että pintaenergia koostuu Lifshitz-van der Waalsin vuorovaikutuksia omaavasta ei-polaarisesta komponentista  $\gamma^{LW}$  sekä Lewisin happoemäsvuorovaikutuksia omaavasta polaarista komponentista  $\gamma^{AB}$ , jolloin kokonaispintaenergia saadaan yhtälöllä (Vihelä 2019)

$$\gamma_i = \gamma_i^{LW} + \gamma_i^{AB}. \quad (8)$$

Jälkimmäinen pintaenergian termi jaetaan vielä kahteen erilliseen osaan varauksen mukaan.  $\gamma^-$  on emäs ja toimii elektronin luovuttajana,  $\gamma^+$  taas happo, joka toimii elektronin vastaanottajana (Vihelä 2019).

$$\gamma_i^{AB} = 2 * (\gamma_i^- * \gamma_i^+)^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Adheesiotyön yhtälöksi kiinteän aineen ja nesteen rajapinnassa tulee täten yhtälön (6) mukaisesti

$$W_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL} = 2 * \left( (\gamma_S^{LW} * \gamma_L^{LW})^{\frac{1}{2}} + (\gamma_S^+ * \gamma_L^-)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_S^- * \gamma_L^+)^{\frac{1}{2}} \right), \quad (10)$$

missä  $\gamma_S$  on kiinteän aineen pintaenergiatiheys [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_L$  on nesteen pintajännitys [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_{SL}$  on kiinteän aineen ja nesteen rajapintajännitys [ $\text{J/m}^2$ ].

Kun yhtälö (10) yhdistetään Young-Dupre-yhtälön (7) kanssa saadaan adheesiotyön yhtälö muotoon (Kwon et al. 2019)

$$W_{SL} = \gamma_L (1 + \cos\theta) = 2 * \left( (\gamma_S^{LW} * \gamma_L^{LW})^{\frac{1}{2}} + (\gamma_S^+ * \gamma_L^-)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_S^- * \gamma_L^+)^{\frac{1}{2}} \right). \quad (11)$$

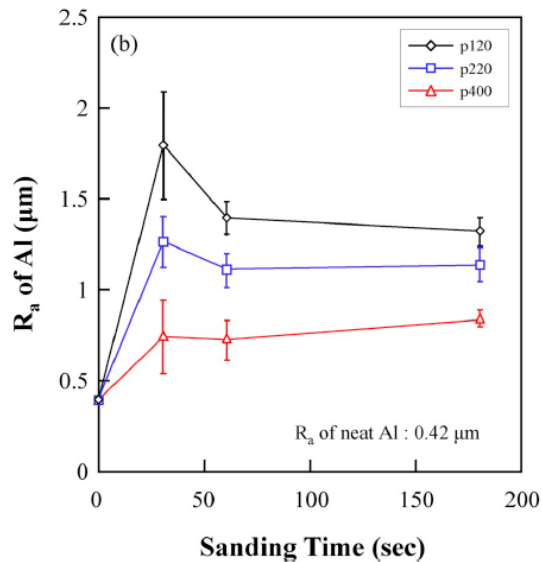
Kiinteän aineen pintaenergian komponentit saadaan laskettua yhtälöryhmä ratkaisemalla, kun suoritetaan kontaktikulmakokeet vähintään kolmella eri nesteellä, joiden pintajännityskomponentit ovat tiedossa. Kiinteän aineen kokonaispintaenergia saadaan edelleen laskettua yhtälöryhmästä ratkaistujen pintaenergiakomponenttien avulla kaavoilla (8) ja (9) (Schuster et al. 2015).

Tutkimuksen koeliimauksille suoritettujen vetokokeiden tuloksista määritettiin keskimääräinen leikkauslujuus liitoksille (lap shear strength, LSS). LSS lasketaan kaavalla

$$LSS = \frac{Q}{A}, \quad (12)$$

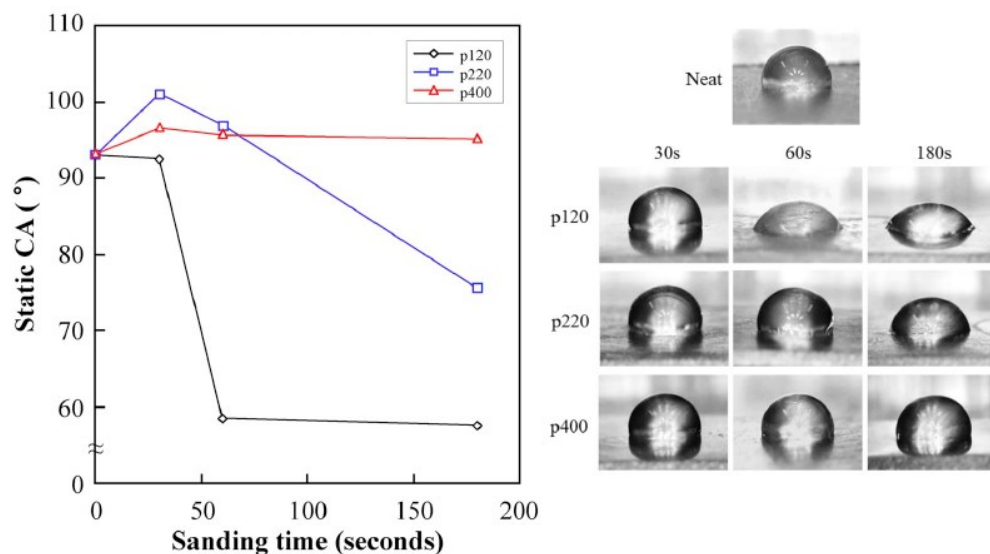
missä LSS on keskimääräinen leikkauslujuus [ $\text{MPa}$ ],  
 $Q$  on koeliitokseen kohdistettu leikkaava voima vauriotilanteessa [ $\text{N}$ ],  
 $A$  on liimapinta-ala liitoksessa [ $\text{m}^2$ ].

Tutkimuksessa huomattiin, että pinnankarheuden Ra-arvo nousi nopeasti ensimmäisen 30 sekunnin hionnan aikana jokaisella hiomapaperin karkeudella. P120 hiomapaperilla pinnankarheuden arvo kasvaa nopeammin kuin hienommilla papereilla. Kaikki kuvassa 20 esitetyt pinnankarheuden käyrät noudattavat samaa kaavaa; 30 sekunnin hionnan jälkeen pinnankarheus saavuttaa maksimiarvonsa ja hioma-ajan kasvaessa pinnankarheus pienenee ja alkaa lähestyä lopullista arvoa.



Kuva 20. Pinnan Ra-arvon kehitys hioma-ajan funktiona eri hiomapapereilla (Kwon et al. 2019).

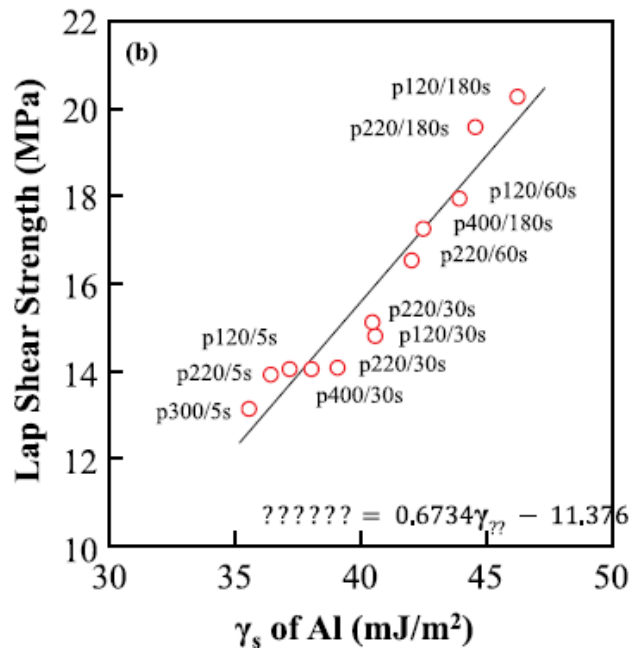
Merkittävää kontaktikulman pienenemistä (kuva 21) ja alumiinikappaleen pintaenergian kasvamista (kuva 22) ei kuitenkaan saavuteta lyhyellä hionta-ajalla johtuen pinnankarheuden epätasaisesta jakautumisesta hiotulla pinnalla.



Kuva 21. Tislattulla vedellä mitatun kontaktikulman kehitys hioma-ajan funktiona eri hiomapapereilla (Kwon et al. 2019).

Koetuloksista saadut LSS-arvot heijastavat edellä esitettyjä tuloksia; 30 s tai lyhyemmällä hioma-ajalla liitoksen keskimääräinen leikkauslujuus kasvaa hyvin vähän jokaisella paperin karkeudella. 60 sekunnin kohdalla leikkauslujuus on parantunut huomattavasti ja se jatkaa kasvamistaan viimeiseen mittauspisteeseen 180 s. Kuvassa 22 on esitettyä tutkimuksessa saadut kokeelliset keskimääräiset leikkauslujuudet liimaliitoksille eri hiomapaperin karkeuksilla ja hioma-ajoilla. Kuvassa vaaka-akselilla on

alumiinikappaleen pintaenergian laskennallinen arvo. Korkein laskennallinen pintaenergia alumiinille sekä suurin keskimääräinen liitoksen leikkauslujuus saavutetaan P120 hiomapaperilla hioma-ajalla 180 sekuntia.



Kuva 22. Kokeellisesti saadut keskimääräisen leikkauslujuuden arvot laskennallisen alumiinin pintaenergian funktiona eri hioma-ajoilla ja hiomapaperin karkeuksilla (Kwon et al. 2019).

### 2.3.2 Natriumhydroksidi- ja hartsikäsittelyn vaikutus adheesiovoimakkuuteen

Mekaanisen pintakäsittelyn lisäksi alumiini-hiilikuituliitoksen adheesiovoimakkuuden kasvattamiseen voidaan pyrkiä alumiinipinnan kemiallisella esikäsittelyllä. Hu et al. (2019) perehtyivät tutkimuksessaan natriumhydroksidilla suoritettavan alumiinipinnan peittauksen vaikutukseen alumiini-hiilikuituliimaliitoksen kuormitettavuuteen yksinkertaisessa limiliitoksessa. Lisäksi työssä tutkittiin asetonilla ohennetulla liimaussepoksin hartsikomponentilla suoritettavan esikäsittelyn (resin pre-coating, RPC) vaikutusta alumiinin ja liiman välisen adheesiovoimakkuuteen.

Tutkimuksessa ultraäänellä asetonissa puhdistetut 3 mm paksut 6060 T5 alumiinilattakappaleet peitettiin joko 0.1, 0.5 tai 1.0 molaarisessa natriumhydroksidiliuoksessa 10 minuutin ajan 55 celsiusasteen lämpötilassa. Käsittelyn jälkeen kappaleet upotettiin tislattuun veteen kymmeneksi minuutiksi reaktion pysäyttämiseksi. Kappaleet puhdistettiin vielä kertaalleen ultraäänellä asetonikylvyssä 10 minuutin käsittelyllä. Koekappaleita peitettiin eri vahvuisilla liuoksilla useampia

kappaleita ja osa koekappaleista upotettiin vielä 10 % hartsia 90 % asetoniliuokseen kymmeneksi sekunniksi ennen liimaamista. Ylimääräinen hartsiliuos poistettiin ravistamalla ja asetonin annettiin haihtua ennen varsinaista liimaustapahtumaa.

NaOH-käsitellyille koekappaleille suoritettiin kontaktikulmamittaus alumiinin pintaenergian selvittämiseksi. Tutkimuksessa käytettiin pintaenergian ratkaisemiseksi Owens-Wendt-Rabel-Kaelble (OWRK) -menetelmää. Menetelmän perustana on pintajännityksen jakaminen dispersiiviseen ja polaariseen komponenttiin ja näistä otettava geometrinen keskiarvo. Dispersiiviseen komponenttiin kuuluvat van der Waalsin sidokset ja muut satunnaiset dispersiovoimien aikaansaamat vuorovaikutukset. Polaariseen komponenttiin sisältyvät dipoli-dipolisidokset sekä vetysidokset. Polaariset sidokset ovat näistä kahdesta komponentista voimakkaampia (Vihelä 2019).

Kwon et al. (2019) tutkimuksen laskennassa käytettyyn van Ossin menetelmään verrattuna OWRK-menetelmä helpottaa kiinteän kappaleen pintaenergian selvittämistä. OWRK-menetelmässä pintaenergia jaetaan kahteen eri komponenttiin, jolloin yhtälöitä tarvitaan kaksi kappaletta ja kontaktikulmatesti tulee näin ollen suorittaa ainoastaan kahdella eri nesteellä, joiden dispersiiviset ja polaariset pintaenergiakomponentit ovat tiedossa. OWRK-menetelmässä kiinteän aineen pintaenergian selvittämiseen käytetään yhtälöparia

$$\begin{cases} \gamma_{L1}(1 + \cos\theta) = 2 * \left( (\gamma_S^D * \gamma_{L1}^D)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_S^P * \gamma_{L1}^P)^{\frac{1}{2}} \right) \\ \gamma_{L2}(1 + \cos\theta) = 2 * \left( (\gamma_S^D * \gamma_{L2}^D)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_S^P * \gamma_{L2}^P)^{\frac{1}{2}} \right) \end{cases} \quad (13)$$

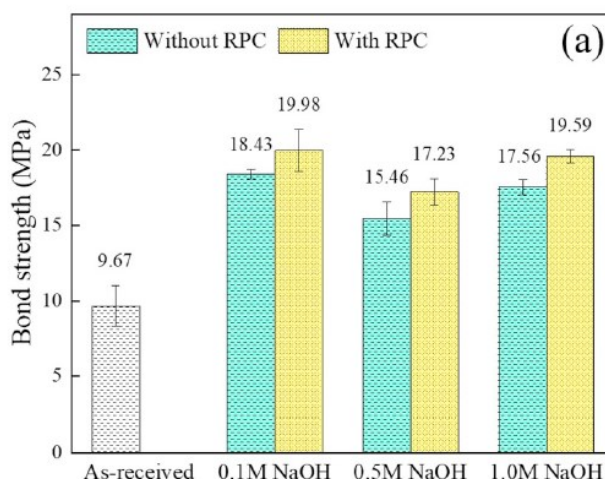
missä  $\gamma_{L1}$  on nesteen 1 pintajännitys [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_S^D$  on kiinteän aineen pintaenergian dispersiivinen komponentti [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_{L1}^D$  on nesteen 1 pintajännityksen dispersiivinen komponentti [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_S^P$  on kiinteän aineen pintaenergian polaarinen komponentti [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_{L1}^P$  on nesteen 1 pintajännityksen polaarinen komponentti [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_{L2}$  on nesteen 2 pintajännitys [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_S^D$  on kiinteän aineen pintaenergian dispersiivinen komponentti [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_{L2}^D$  on nesteen 2 pintajännityksen dispersiivinen komponentti [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_S^P$  on kiinteän aineen pintaenergian polaarinen komponentti [ $\text{J/m}^2$ ],  
 $\gamma_{L2}^P$  on nesteen 2 pintajännityksen polaarinen komponentti [ $\text{J/m}^2$ ].



Koekappaleiden pintaenergian selvittämiseksi tutkimuksessa suoritettiin kontaktikulmatestit sekä vedellä että 1-brominaftaleenilla natriumhydroksidilla käsitellyille alumiinikappaleille. Saatuja pintaenergia-arvoja vertailemalla huomataan, että suurin pintaenergian arvo saavutetaan 1-molaarisella natriumhydroksidilla käsitellyllä koekappaleella. Käsittelemättömään kappaleeseen verrattuna pintaenergia kasvoi 53,5 %. Tutkimusryhmän mukaan kasvanut arvo selittyy käsittelyn aikana alumiinin pintaan syntyvällä ohuella hydroksidikerroksella. Lisäksi on huomioitava, että alumiinikappaleen kappaleen pinta puhdistuu perusteellisesti peittausprosessin aikana.

Käsitellyt alumiinikappaleet liimattiin limiliitoksella kaksikomponenttista suurilujuuksista epoksiliimaa käyttäen hiilikuitukappaleisiin ja liiman annettiin kovettua 72 h 60°C korotetussa lämpötilassa. Tämän jälkeen koekappaleille tehtiin leikkauskuormituskokeet, joissa pyrittiin selvittämään liimaliitoksen keskimääräiset leikkauslujuudet sekä kuormitus-venymäkäyrät eri tavalla käsitellyille koekappaleille.

Kokeiden tuloksista huomataan, että ero NaOH-käsiteltyjen ja käsittelemättömien koekappaleiden välillä leikkauslujuudessa on merkittävä. Pintaenergian määrittelystä poikkeavasti pelkällä natriumhydroksidilla käsitellyistä kappaleista suurin leikkauslujuuden arvo, 18,43 MPa, saavutettiin 0,1-molaarisella liuoksella käsitellyllä kappaleella. Toiseksi suurin leikkausjännitys, 17,56 MPa, saavutettiin 1-molaarisella liuoksella käsitellyllä kappaleella. Näiden väliin jäävä tapaus jäi merkittävästi heikommaksi koetuloksissa arvolla 15,46 MPa. Huomionarvoista on, että parhaassa tapauksessa leikkauslujuus parani peräti 91 % verrattaessa käsittelemättömään alumiinikappaleeseen. Hartsikäsitteily paransi leikkauslujuutta eniten väkevimällä liuoksella käsitellyn alumiinikoekappaleen tapauksessa, tällöin arvo parani 2,03 MPa. Mitä laimeammalla liuoksella alumiini peitattiin sitä pienemmäksi hartsikäsitteilyn vaikutus aleni. Tutkimuksessa saadut leikkauslujuuden arvot on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Eri pintakäsittelyillä saavutetut keskimääräisen leikkauslujuuden arvot (Hu et al. 2019).

Se, että laimeallakin natriumhydroksidiliuoksella suoritettu käsittely aiheuttaa suuren leikkauslujuuden kasvun selittyy pintaenergiatarkastelussakin mainitulla alumiinin pintaan muodostuvalla ohuella alumiinihydroksidikerroksella, joka korvaa alumiinin pinnalle hapen vaikutuksesta nopeasti muodostuvan mekaanisesti heikon oksidikerroksen. Eri väkevyisillä liuksilla suoritettujen käsittelyjen erikoiselta vaikuttava merkitys leikkauslujuuden määräytymisessä selittyy tutkijoiden mukaan pinnankarheuden arvon ja pinnan huippujen määrän perusteella. Väkevällä liuksella käsitellyn kappaleen kokonaispintaenergia on vertailun suurin, sillä suuri pinnan epätasaisuuksien määrä lisää samalla pinnan kokonaispinta-alaa. Käsittelyssä muodostuvat kapeat mikrohalkeamat voivat kuitenkin aiheuttaa ilmakuplien jäämisen loukkuun liimaustilanteessa, jolloin pinnan kastuvuus kontaktikulmamittauksessa käytettyjä nesteitä suurempiviskositeettisella liimalla on rajallista. Suuren pintaenergiansa takia väkevimmällä liuksella käsitelty kappale aiheuttaa silti lähes laimeinta liuosta vastaavan leikkauslujuuden liitokselle. Heikoin tilanne on 0,5-molaarisella liuksella, jonka alumiinille aiheuttama pintaenergian kasvu on jo lähtökohtaisesti väkevää liuosta heikompi, eikä pinnan kastuvuuskaan tuloksien perusteella ole juurikaan parempi. Hartsikäsittelyn vaikutuksen kasvaminen siirryttäessä laimeasta liuksesta väkevämpään selittyy juuri pinnanmuotojen määrällä ja niiden suhteellisella koolla. Kun heikkoa kastuvuutta aiheuttavia teräviä pinnanmuotoja on eniten kasvaa kastuvuutta lisäävän hartsikäsittelymenetelmän vaikutus suurimmaksi.

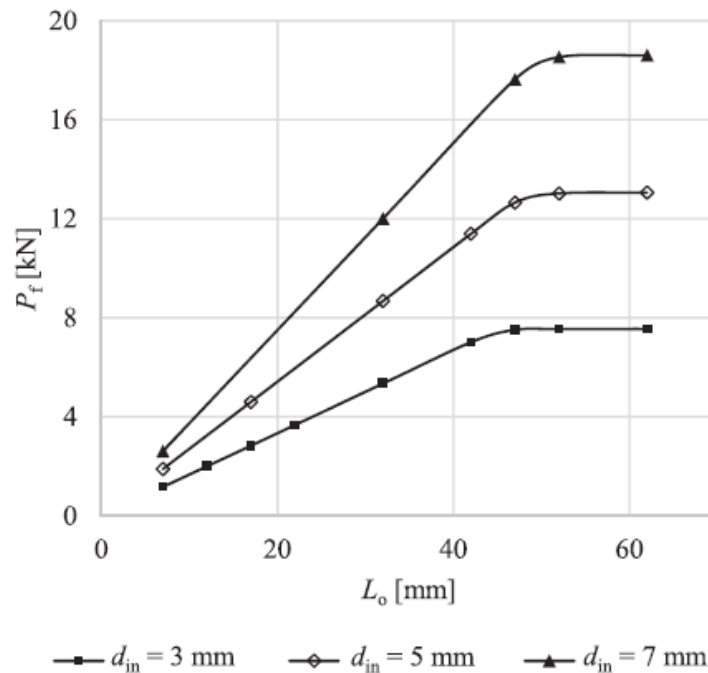
## 2.4 Liimaliitoksen lujuuden optimointi sylinterimäisessä liitoksessa

Työssä tarkasteltavan käyttökohteen takia erityistä mielenkiintoa herättää sylinterimäisen yksinkertaisen limiliitoksen rakenteen optimointi. Hiilikuituputkilla toteutettujen sauvarakenteiden yleistymisen ansiosta sylinterimäisiä hiilikuitu-alumiiniliitoksia on tutkittu laajasti. Lavalette et al. (2020) tutkimuksessa tarkasteltiin koesarjan avulla varmennetulla laskentamallilla hiilikuituputkien ja ulkopuolisten alumiiniholkkien välistä liimaliitosta. Laskentatapauksien muuttujina muutettiin liimakerroksen pituutta ja paksuutta, hiilikuituputken halkaisijaa, holkin ja hiilikuituputken seinämävahvuutta sekä holkin ja putken päätyyn tehdyn viisteen pituutta.

Geometrisista suureista kappaleiden halkaisijan sekä liimaliitoksen pituuden havaittiin tutkimuksessa vaikuttavan voimakkaimmin liimaliitoksen vauriokuormaan. Halkaisijaa ja liimaliitoksen pituutta kasvatettaessa vauriokuorma kasvaa lähes lineaarisesti. Tämän voidaan katsoa johtuvan suoraan kasvaneesta liimapinta-alasta, sillä liimapinnan leveys poikittaissuunnassa on suoraan verrannollinen kappaleiden rajapinnan halkaisijaan. Liimaliitoksen keskimääräisen leikkauslujuuden kaavasta (12) voidaan ratkaista voima, jolloin huomataan, että vauriokuorma saadaan liimapinta-alan ja keskimääräisen leikkauslujuuden tulona. Sylinterimäinen liimaliitos vastaa kaksoislimiliitosta siinä suhteessa, että kuormittavan voiman aiheuttama taipuma liimattavissa kappaleissa on pääosin tuettua johtuen liitoksen symmetrisyydestä keskiakselin suhteen. Näin ollen liitoksen kuormitus on lähempänä puhdasta leikkauskuormitusta kuin esimerkiksi yksinkertaisen limiliitoksen, jolloin on ymmärrettävää, että vauriokuorman kehitys seuraa läheisesti yksinkertaistettua keskimääräisen leikkauslujuuden kaavaa.

Halkaisijan kasvatukselta poiketen liimapinnan pituutta kasvatettaessa tulee jossakin vaiheessa vastaan raja, jonka yläpuolella liitoksen kuormitettavuus ei enää kasva. Cognard et al. (2010) sylinterimäisiä liimaliitoksia tarkastelevan tutkimuksen tuloksista on huomattavissa, että vaikka kasvava liimapinta-ala lisää liitoksen keskimääräistä leikkauslujuutta kasvattaa liimapinnan pituuden lisääminen myös leikkaus- ja normaalisuuntaisen jännityksen huippuarvoja liimapinnan päädyissä. Näin ollen tietyssä pisteessä kasvanut jännityshuippu aiheuttaa vaurion ydintymisen liimapinnan päätyyn alhaisemmalla liitoksen kuormituksella kuin olisi keskimääräisen leikkausjännityksen avulla määritettävissä vauriokuormaksi kyseiselle liitokselle. Lavalette et al. (2020) tutkimuksen laskentatuloksista on huomattavissa riippuvuus liimaliitoksen

nimellishalkaisijan ja liimapinnan pituuden kasvatuksen raja-arvon käyttäytymisen välille. Nimellishalkaisijan kasvattaminen nostaa hieman liimapinnan pituuden raja-arvoa. Tämä ilmiö selittyy myös liimaliitoksen jännityshuipun suuruudella, sillä kun liimaliitoksen efektiivistä leveyttä kasvatetaan halkaisijaa kasvattamalla, jakautuu liimaliitoksen päädyn jännityshuippu suuremmalle alalle leveyssuunnassa. Kuvassa 24 on esitetty vauriokuormituksen kehittyminen liimapinnan pituuden funktiona kolmella eri liitoksen nimellishalkaisijalla.

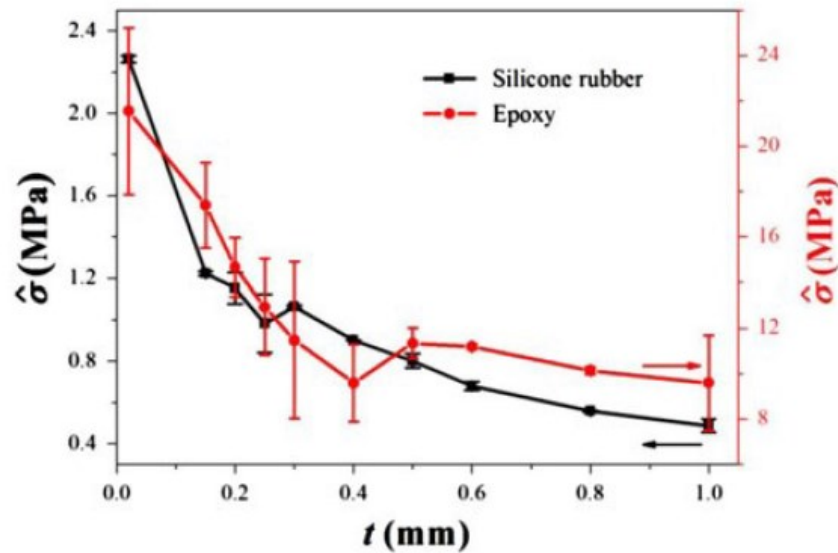


Kuva 24. Vauriokuormitus sylinterimäisessä liimaliitoksessa liimapinnan pituuden funktiona kolmella eri nimellishalkaisijalla (Lavalette et al. 2020).

Lavalette et al. (2020) tutkimuksen tuloksien perusteella liimakerroksen paksuudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta liimaliitoksen kuormitettavuuteen. Tutkimuksessa käytetyn laskentamallin mukaan kuormitettavuuden pitäisi kasvaa hiljalleen siirryttäessä kohti paksumpaa liimakerrosta. Suoritetuissa kokeissa saadun datan mukaan 0,2 mm paksuuden alapuolella tapahtuu pientä vauriokuorman kasvua kerrospaksuuden pienentyessä, kun taas kyseisen arvon yläpuolella vauriokuormitus pysyy vakiona. Liimakerroksen paksuuden vaikutuksesta liimaliitoksen kuormitettavuuteen on tehty lukuisia muitakin tutkimuksia. Yang et al. (2014) tutkimuksessa pyrittiin selvittämään liimakerroksen paksuuden ja käytetyn liiman mekaanisten ominaisuuksien vaikutus liimaliitoksen kuormitettavuuteen. Tutkimuksen pääpainona oli limiliitoskoekappaleille tehtävät vetokokeet. Koekappaleiden liimaukseen käytettiin haurasta 2-komponenttista epoksia sekä sitkeää silikoniliimaa ja liimakerroksen paksuutta vaihdeltiin välillä 0,02–

1,0 mm. Yhteensä liimauskoeappaleita tehtiin tutkimuksessa 60 kappaletta, 30 kummallakin liimatyyppillä.

Koekappaleiden vetokokeista saaduista tuloksista voidaan nähdä, että liimakerroksen keskimääräinen leikkauslujuus laskee nopeasti liimakerroksen paksuutta kasvatettaessa sekä epoksi- että silikoniliimalla liitetyissä koekappaleissa. Epoksiliimalla on leikkauslujuuden kuvaajasta (kuva 25) havaittavissa erityinen kriittinen liimakerroksen paksuus  $t_c=0,4$  mm, jonka yläpuolella liitoksen leikkauslujuus ei merkittävästi enää pienene. Kriittisen paksuuden yläpuolella leikkauslujuuden arvo 10 MPa on hyvin lähellä tutkimuksessa liimamateriaalille leikkauskokeella määritettyä leikkauslujuutta 9,2 MPa. Sama huomataan myös silikonikumiliiman leikkauslujuuskuvaajasta. Tämän liiman mitatuksi keskimääräiseksi leikkauslujuudeksi saatiin tutkimuksessa tehdyissä kokeissa 0,6 MPa. Liiman kuvaajasta on havaittavissa kuvaajan kulmakertoimen pieneneminen lähestyttäessä kyseistä arvoa. Liitoksen leikkauslujuus näyttäisi kuitenkin laskevan lopulta pienemmäksi kuin 0,6 MPa. Liimaliitoksilla suoritetuissa kokeissa käytetyllä liimakerroksen maksimipaksuudella 1,0 mm ei kuitenkaan vielä saavuteta tasoa, jossa liitoksen leikkauslujuus vakiintuisi. Puhtaan liiman leikkauslujuuden alittumista voi selittää liiman suurempi elastisuus ja maksimivenymä, joiden ansiosta kuormitus liimapinnan etureunalla ehtii suurilla liimakerroksen paksuuksilla vaihtua vallitsevasti vetokuormitukseksi ennen liiman leikkauslujuuden ylittymistä. Suuri vauriovenymä yksinkertaisen limiliitoksen liimasaumassa paksua liimakerrosta käytettäessä aiheuttaa myös verrattain suuren taivutusmomentin liimattaviin kappaleisiin, jolloin kuormitustilanne muuttuu entistä enemmän vetokuormituspainotteiseksi. On huomioitava, että tämänkaltainen käyttäytyminen on hyvin rajoittunutta sylinterimäisissä liimaliitoksissa, joissa symmetrisuus liitoksen pituusakselin suhteen estää suuren taivutusmomentin syntymisen liimattaviin kappaleisiin.



Kuva 25. Liimakerroksen paksuuden vaikutus liitoksen leikkauslujuuteen (Yang et al. 2014).

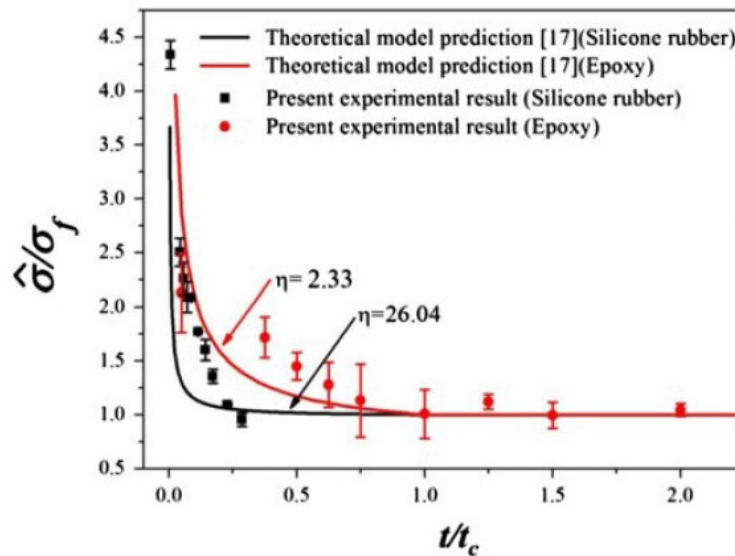
Havaittu leikkauslujuuskäyttäytyminen sopii Xu & Wei (2013) esittämään teoriaan, jossa liitoksen leikkauslujuuden ja liimamateriaalin leikkauslujuuden suhde määritellään liimakerroksen paksuuden ja kriittisen liimakerroksen paksuuden suhteen sekä liimamateriaalin sitkeyden avulla siten, että

$$\tau_B/\tau_{adh} = \begin{cases} \sqrt{\frac{1+\eta\left(\frac{t}{t_c}\right)}{(1+\eta)\left(\frac{t}{t_c}\right)}}, & \text{kun } t < t_c, \\ 1, & \text{kun } t \geq t_c \end{cases} \quad (14)$$

missä  $\tau_B$  on liitoksen leikkausmurtolujuus [MPa],  
 $\tau_{adh}$  on liimamateriaalin leikkauslujuus [MPa],  
 $\eta$  on liimamateriaalin sitkeyskerroin,  
 $t$  on liimakerroksen paksuus [mm]  
ja  $t_c$  on liimakerroksen kriittinen paksuus [mm].

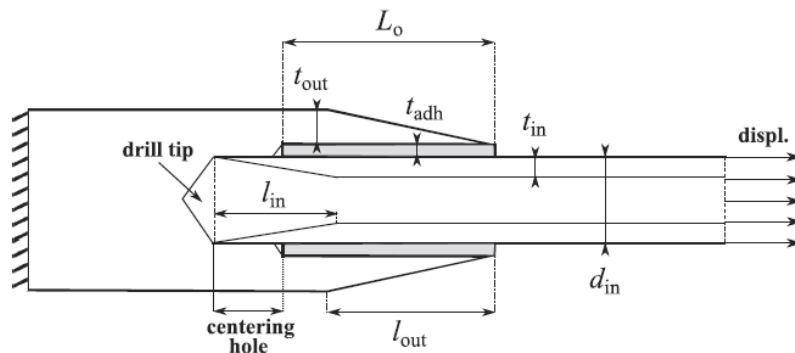
Kuvassa 26 on esitetty vetokokeiden sekä edellä esitetyn teoreettisen mallin antamat tulokset normalisoidulle liimaliitoksen leikkauslujuudelle normalisoidun liimakerroksen paksuuden funktiona. Normalisoidulla liimaliitoksen leikkauslujuudella tarkoitetaan liimaliitoksen keskimääräisen leikkauslujuuden suhdetta liimamateriaalin leikkauslujuuteen ja normalisoidulla kerrospaksuudella liimakerroksen paksuuden suhdetta kriittiseen kerrospaksuuteen. Kuvaajista on nähtävissä, että epoksiliimalla teoreettinen malli vastaa melko tarkasti koetuloksia lukuun ottamatta tilannetta, jossa

kerrospaksuuden ja kriittisen kerrospaksuuden suhde on lähelle 0,5. Tällöin mallin mukainen normalisoitu leikkauslujuus on merkittävästi matalammalla tasolla. Sitkeällä silikoniliimalla koeliimaliitoksissa käytetyt kerrospaksuudet jäävät auttamatta liian ohuiksi tulosten kattavaa vertailua varten. Kuitenkin koetulosten huomataan muodostavan selvästi laskeva leikkauslujuuden kuvaaja, joka näyttäisi laskevan mallin esittämän tason alapuolelle jo normalisoidun kerrospaksuuden arvon 0,3 yläpuolella.



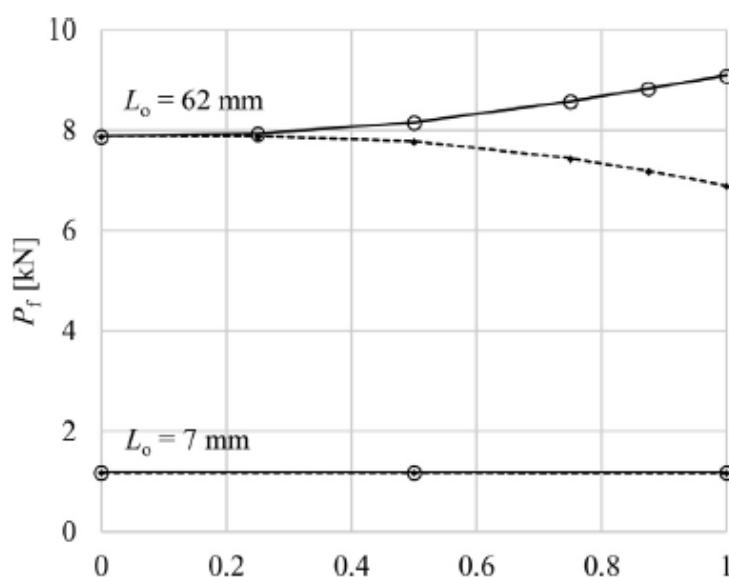
Kuva 26. Normalisoitu leikkauslujuus normalisoidun kerrospaksuuden funktiona epoksi- ja silikoniliimalla teoreettisen mallin sekä koetulosten mukaan (Yang et al. 2014).

Lavalette et al. (2020) tutkimuksessa tutkittiin myös sylinterimäisen komposiitti-alumiiniliimaliitoksen liimattavien kappaleiden päätyviisteiden pituuden ( $l_{in}$  ja  $l_{out}$  kuvassa 27) vaikutusta liitoksen kuormitettavuuteen. Viisteen vaikutusta tarkasteltiin liimapinnan pituuksilla 7 ja 62 mm. Viisteen pituuden maksimiarvoksi määriteltiin liimapinnan pituus, jotta viiste ei vaikuttaisi liimattavien kappaleiden paksuuteen liimapinnan ulkopuolella.



Kuva 27. Tutkimuksessa määritetyt liimaliitosgeometrian muuttujat (Lavalette et al. 2020).

Lyhyellä liimapinnan pituudella varustettujen koekappaleiden kohdalla viisteen pituudella ei havaittu minkäänlaista vaikutusta liitoksen kuormitettavuuteen. Sen sijaan 62 mm liimapintaa käytettäessä havaittiin, että ulkopuolisen liimattavan kappaleen eli alumiinisen holkin viisteen pituutta kasvattamalla liitoksen vauriokuorma kasvoi n. 1 kN siirryttäessä olemattomasta viisteestä täyspitkään eli 62 mm pitkään viisteeseen. Sisäputken päädyn viisteen kasvattamisella havaittiin päinvastainen vaikutus; täysi 62 mm pitkä viiste pienensi vauriokuormaa viistämättömästä tilanteesta noin 1 kN verran. Kokeiden tuloksista piirretty viisteen pituuden kertoimen ja liitoksen vauriokuorman välisen yhteyden esittävät kuvaajat on esitetty kuvassa 28.



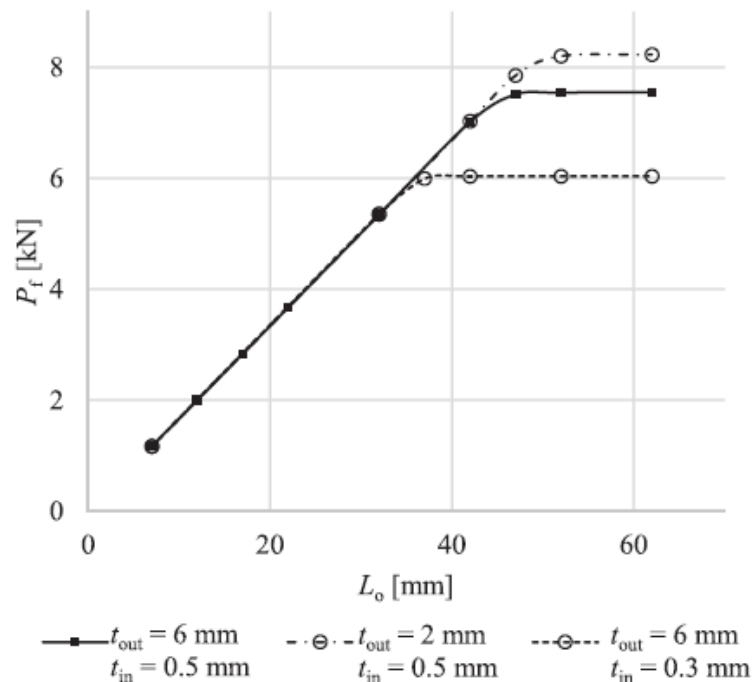
Kuva 28. Viisteen pituuden vaikutus liitoksen kuormitettavuuteen. Katkoviivalla esitetty hiilikuituputken viisteen pituuden  $l_{in}$  vaikutus ja yhtenäisellä viivalla alumiiniholkin viisteen pituuden  $l_{out}$  vaikutus (Lavalette et al. 2020).

Raportin mukaan ero viisteen pituuden vaikutuksessa sisemmän ja ulomman kappaleen välillä johtuu liimattavien kappaleiden jäykkyyserosta. Komposiittiputken jäykkyys aksiaalisuunnassa on alumiinikappaletta pienempi, sillä koekappaleissa käytetty seinämävahvuus hiilikuituputkella on luokkaa 0,5 mm kun taas alumiiniholkin seinämävahvuus vaihtelee välillä 2–6 mm. Vaikka hiilikuidun kuidunsuuntainen kimmokerroin onkin yli kolminkertainen alumiiniin verrattuna madaltaa matriisina käytetty epoksihartsi laminaatin kokonaiskimmokerrointa (Saarela et al. 2019, luvut 3.4 ja 6.4). Hiilikuituputken konstruktioista riippuen putkimateriaalin pituussuuntainen kimmokerroin voi täten olla hyvin lähellä alumiinin kimmokerrointa (Mäkelä et al. 2015, s. 151). Kun kappaleista jäykempään eli alumiinikappaleeseen tehdään mahdollisimman pitkä viiste tasoittuu kappaleiden seinämävahvuuksien eroavaisuuden aiheuttamasta



jäykkyyserosta johtuva jännityshuippu liimasauman etureunassa huomattavasti aiheuttaen vaurion ydintymiskuorman kasvamisen. Kun viiste tehdään hiilikuituputkeen, lisätään kappaleiden välistä jäykkyyseroa entisestään, jolloin jännityshuippu liimasauman reunassa kasvaa.

Vastaava ilmiö on havaittavissa koesarjasta, jossa muutettiin alumiinisen ulkopolin ja hiilikuituputken seinämävahvuutta liimauskoekappaleiden välillä. Pienellä liimapinnan pituudella liimattavien kappaleiden seinämävahvuuksien erolla ei ollut havaittavaa vaikutusta liitoksen vauriokuormaan. Noin 35 mm kohdalla suurimmalla seinämävahvuuserolla olevan koeliitoksen vauriokuorman kasvu liimapinnan pituuden funktiona hidastuu ja lakkaa pian kokonaan, kun liimapinnan pituutta kasvatetaan entisestään. Pienemmällä seinämävahvuuserolla olevissa liitoksissa liimapinnan pituuden aiheuttama hyöty jatkuu lineaarisena tästä ylöspäin ja viimeisimpänä saavutettu hyöty pienenee koeliitoksessa, jossa alumiinipolkin seinämävahvuus on 2 mm ja hiilikuituputken 0,5 mm. Koeliitosten vauriokuormat liimapinnan pituuden funktiona on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Liimaliitoksen vauriokuormitus liimapinnan pituuden funktiona kolmella eri seinämävahvuusyhdistelmällä (Lavalette et al. 2020).

Kappaleiden välinen jäykkyysero ei tässä tapauksessa vaikuta pienillä liimapinnan pituuksilla. Liimaliitosten lujuutta käsittelevässä kappaleessa 2.1 todettiin, että liimapinnan pituuden kasvaessa kasvavat sekä normaali- että leikkausjännitysten

huippuarvot liimapinnan reunoilla. Toisin sanoen lyhyemmällä liimapinnan pituuksilla jännitykset ovat jakaantuneet tasaisemmin koko liimanpinnan alalle, jolloin vaurio tapahtuu kerralla suurella osalla liimapintaa. Kasvatetulla liimapinnan pituudella vaurio alkaa liimapinnan jännityshuipun kohdalta, jolloin tällaisessa tilanteessa jännityshuippujen pienentämiseen tähtäävät menetelmät tuottavat suurimman edun liitoksen vauriokuorman kannalta.

### 3 LIIMALIITOS TUKIVARSIEN PÄÄTYHOLKEISSA

Formula Student Oulun vuoden 2021 kilpailuihin kehittämän M03 EVO -auton pyöräntuenta on toteutettu päällekkäisillä kolmiotukivarsilla. Nykyisten tukivarsien rakenne on kokonaan terästä ja ne koostuvat 16 mm putkista, sisäpäähän hitsatuista kierreholkeista sekä ulkopäähän hitsatusta putket yhdistävästä teräksisestä yhdyskappaleesta. Sisäpäästä putket kiinnittyvät runkoon M8 tai M6-ulkokierteellä varustetuilla raidetangonpäillä. Kuvassa 30 on esitetty nykyinen tukivarsikonstruktio.



Kuva 30. Nykyinen teräksinen tukivarsikonstruktio.

Uudet hiilikuituiset tukivarret on suunniteltu käyttämään teräsputkien tilalla 18 mm hiilikuituputkia 2 mm seinämävahvuudella. Putkien päihin liimataan sisäpuoliset alumiiniholkit. Päätyholkkeihin tehtyjen M8- ja M6-sisäkierteiden avulla putkiosiin voidaan kolmiotukivarren sisäpäissä liittää raidetangonpäät. Ulkopäässä kolmiotukivarren molemmat putket liitetään pulteilla erilliseen liitoskappaleeseen.

Valittu hiilikuituputken halkaisija ja seinämävahvuus määräytyivät yhdistetysti riittävän poikkileikkauspinta-alan sekä hiilikuituputken saatavuuden perustella. Suuri putken halkaisija on liimaliitoksen kannalta edullinen, sillä holkin liimapinnan pituus aksiaalisuunnassa voidaan tällöin jättää lyhyemmäksi. Tämä tarkoittaa puolestaan kevyempää konstruktiota alumiiniholkin pituuden lyhentyessä. Koeliimauksia varten suunnitellussa holkissa liimapinnan pituudeksi määritettiin 36 mm. Vanhoille

terästukivarsille ajotilanteessa tehtyjen venymäliuskamittausten perusteella yksittäiselle tukivarrelle määritettiin suunnittelukriteeriksi 10 kN kuormitus. Kun huomioidaan hiilikuituputken sisähalkaisija 14 mm saadaan keskimääräiseksi leikkausjännitykseksi liimaliitoksessa

$$\tau = \frac{Q}{A} = \frac{10000N}{\pi \cdot 14mm \cdot 36mm} = 6,3 \frac{N}{mm^2}. \quad (15)$$

Liimatoimittaja Henkelin kanssa käytyjen keskustelujen perustella käytettäväksi liimaksi valikoitui Loctite EA 9466. Kyseinen liima on kaksikomponenttinen, suurilujuuksinen ja sitkostettu epoksirakenneliima. Saatavilla on korotetun lämpötilan vaikutuksesta kovettuvia 1-komponenttisiä epoksiliimoja, joilla päästään valittua liimaa parempiin lujuusarvoihin sekä lämpötilankesto. Liimaustapahtuman helppouden takia päädyttiin kuitenkin kaksikomponenttiseen liimaan. Valittu Loctite EA 9466 kovettuu huoneenlämpötilassa kolmen vuorokauden aikana nimellislujuuteensa. Korotetussa lämpötilassa kovettamalla saadaan liiman lujuusarvoja hieman korotettua. Valmistajan esitteessä todetaan, että 80°C tai 100°C lämpötilassa 45 min kovetettuna liima saavuttaa 10 % nimellisiä lujuusarvoja suuremman lujuuden. Tyypillisesti kovettuneen liima-aineen lämmönkesto saadaan myös parannettua kovettamalla liima korotetussa lämpötilassa. Korotettu lämpötilankesto voi olla toivottua myös tarkasteltavassa käyttökohteessa, sillä autoa joudutaan seisottamaan asvaltilla pitkiä aikoja. Lisäksi pakoputki aiheuttaa saman puolen takatukivarsille enemmän tai vähemmän lämpökuormaa läheisyytensä takia riippuen lopullisesta putkiston rakenteesta.

Valmistajan esitteessä (Henkel Adhesive Technologies 2019) on mainittu liimasauman tyypillisiä leikkauslujuuksia eri materiaalista tehtyjä kappaleita liimattaessa. Esitetyistä arvoista tarkasteltavan käyttökohteen kannalta kiinnostavimpia ovat mekaanisesti karhennetulle sekä anodisoidulle alumiinille annetut arvot. Mekaanisesti karhennettujen alumiinikappaleiden välisen liimauksen leikkauslujuudeksi annetaan 26,0 N/mm<sup>2</sup>, anodisoiduille kappaleille taas 17,9 N/mm<sup>2</sup>. Työtä varten tarkastellun kirjallisuuden perusteella mekaanisesti karhennettujen alumiinikappaleiden liitokselle annettu arvo on suurempi kuin tyypillisesti kokeissa hiilikuitu-alumiiniliitokselle saadut arvot. Hiilikuitukomposiitti on adheesion kannalta materiaaliparin välisen liimaliitoksen heikoin lenkki, sillä laminaattia kasassa pitävän epoksin pintaenergian arvo, noin 43 dyne/cm, on huomattavasti alumiinin arvoa 840 dyne/cm pienempi (3M 2021). Tämän

takia hiilikuidun pintakäsittelyn voidaan olettaa olevan liitoksen kestävyuden kannalta kriittinen tekijä.

Hiilikuidun ja alumiinin väliseltä liimaliitokselta voidaan täten kappaleiden pintakäsittelyistä riippuen odottaa jonkin verran heikompaa leikkauslujuutta kuin alumiinikappaleiden välisessä liitoksessa. Arenas et al. (2013) tutkimuksessa perehdyttiin kappaleiden pintakäsittelyn vaikutukseen alumiini-hiilikuituliimaliitoksen tapauksessa. Tässä työssä tarkasteltavaa käyttötarkoitusta ajatellen tutkimus on mielenkiintoinen, sillä toinen koeliimauksissa käytetty liima oli tukivarsien holkkien liimaksi suunniteltu Loctiten 9466 kaksikomponenttiepoksiliima.

Tutkimuksessa alumiinikoekappaleet käsiteltiin ennen liimausta joko hiekkapuhaltamalla tai hiomapaperilla hiomalla. Hiekkapuhalluksessa käytettiin hiovina hiukkasina raekooltaan 120 µm alumiinioksidia. Käytetyn hiomapaperin keskimääräinen raekoko oli 320 µm, jolloin hiomapaperin karkeutta kuvaava P-luku olisi luokkaa P50. Hiekkapuhaltamalla käsiteltyjen alumiinikappaleiden pinnankarheuden Ra-arvoksi määritettiin 1,3 µm. Hiomapaperilla käsiteltyjen alumiinikappaleiden vastaavaksi arvoksi saatiin 1 µm. Hiilikuitukomposiittikoekappaleita käsiteltiin mainittujen menetelmien lisäksi myös laminoimisen yhteydessä liimapinnan kohdalta päällimmäiseksi kerrokseksi laminoitavalla karhennuskankaalla. Karhennuskangas on nailonista kudottu ohut kangas, joka repäistään kappaleen pinnasta laminaatin matriisiaineen kovetuttua. Kankaan jäljiltä kappaleen pintaan jää kankaan pintakuvio, jolloin tartuntapinta-ala liimalle on huomattavasti suurempi kuin kiiltävässä epoksipinnassa. Hiilikuitukoekappaleiden pinnankarheuden arvoksi saatiin hiekkapuhaltamalla 1,8 µm, hiekkapaperilla hiomalla 1,5 µm ja karhennuskangasta käyttäen 1,5 µm.

Tutkimuksessa suoritettujen vetokokeiden tulokset on esitetty kuvassa 31. Esitetystä taulukosta voidaan huomata, että Loctite 9466 -epoksilla liimatuissa koekappaleissa suurimmat leikkauslujuudet saavutettiin tilanteissa, joissa alumiini on käsitelty hiekkapuhaltamalla ennen liimausta. Hiilikuidun osalta suurimpaan leikkauslujuuteen päästiin, kun hiilikuitukappale oli käsitelty hiomapaperilla. Irrotuskankaalla saavutettu leikkauslujuus on hieman pienempi, kun taas hiekkapuhaltaminen komposiitin pintakäsittelynä jää huomattavasti muista arvoista. Parhaissa tapauksissa leikkauslujuudet ovat 18,81 MPa sekä 17,01 MPa. Taulukosta nähdään myös tulosten vaihteluväli sekä keskihajonta eri tapauksissa, kun jokaista pintakäsittelyparia testattiin

viidellä eri koekappaleella. Lisäksi taulukossa on esitetty vaurion jälkeisestä liimapinta-alasta mitatut prosentuaaliset osuudet koheesio- ja adheesiovauriolle sekä näiden yhdistelmälle. Epoksiliiman osalta on huomattavissa, että kaikissa heikomman leikkauslujuuden tapauksissa vaurio on täysin adhesiivinen. Näin ollen voidaan todeta, että kyseistä liimaa käytettäessä adheesion onnistuminen on kriittistä liimaliitoksen kestävyuden kannalta.

Surface treatment			Failure stress (MPa)	Range (MPa)	Typical deviation (MPa)	Failure mode (%)		
No.	Carbon fibre (Ra in $\mu\text{m}$ )	Aluminium (Ra in $\mu\text{m}$ )				Adh.	Coh.	Mix.
Polyurethane Teromix® 6700								
P1	Sanded (1.5)	Sanded (1)	11.40	2.78	1.25	0	20	80
P2	Sanded (1.5)	Sandblasted (1.3)	14.81	3.89	2.06	0	0	100
P3	Peel ply (1.5)	Sanded (1)	12.42	4.95	1.76	0	80	20
P4	Peel ply (1.5)	Sandblasted (1.3)	13.13	4.72	1.97	0	40	60
P5	Sandblasted (1.8)	Sanded (1)	12.81	4.55	2.00	0	20	80
P6	Sandblasted (1.8)	Sandblasted (1.3)	11.86	4.87	1.74	60	0	40
Epoxy Loctite® 9466								
E1	Sanded (1.5)	Sanded (1)	12.04	5.13	2.03	100	0	0
E2	Sanded (1.5)	Sandblasted (1.3)	18.81	6.42	3.67	40	40	20
E3	Peel ply (1.5)	Sanded (1)	12.70	5.51	2.53	100	0	0
E4	Peel ply (1.5)	Sandblasted (1.3)	17.01	6.54	3.21	0	40	60
E5	Sandblasted (1.8)	Sanded (1)	13.03	9.16	2.09	100	0	0
E6	Sandblasted (1.8)	Sandblasted (1.3)	14.44	9.23	3.78	60	0	40

Kuva 31. Hiilikuitu-alumiinikoeliitosten vetokokeista saadut tulokset (Arenas et al. 2013).

Tutkimuksen tuloksena saadut hiilikuitukomposiitti-alumiiniliimaliitoksen leikkauslujuuden arvot ovat parhaimmillaan samaa suuruusluokkaan kuin liimatoimittajan esitteessä (Henkel Adhesive Technologies 2019) anodisoitujen alumiinikappaleiden liimaliitokselle annettu arvo  $17,9 \text{ N/mm}^2$ . Mekaanisesti karhennetulle alumiinille annettuun arvoon  $26,0 \text{ N/mm}^2$  ei kuitenkaan päästä. Heikompi leikkauslujuuden arvo perustunee osittain aikaisemmin tässä kappaleessa esitettyyn eroon kappaleiden materiaalien pintaenergioissa, osittain taas kappaleiden jäykkyysron aiheuttamiin jännityshuippuihin liimaliitoksen reunoilla. Tutkimuksen tulosten perusteella tukivarsien päätyholkkien koeliimauksien vetokokeissa voidaan odottaa yli  $25 \text{ kN}$  vauriokuormia, mikäli pintojen esikäsitelyssä onnistutaan hyvin. Tällöin saavutettaisiin yli 2,5-kertainen kuormankesto liitoksen suunnittelun perusteena käytettyyn maksimikuormaan verrattuna.

Björk et al. (2014) kirjassa esitettävien varmuuskertoimien avulla voidaan määrittää approksimaatio liitoksen leikkausvaihtolujuudelle. Tukivarsiin kohdistuva kuormitus on tyypiltään vaihtokuormitusta, sillä kuormituksen suunta riippuu siitä, onko ajoneuvo kyseisten tukivarsien puolelle kaartavassa liikkeessä ja kiihdyttääkö vai jarruttaako ajoneuvo. Lyhytaikaiselle, alle  $500 \text{ h}$  kestäväälle dynaamiselle kuormitukselle on kirjassa annettu sivulla 217 varmuusluvuksi 1,5, kun liitoksen kannalta kriittisemmän kuormitussuunnan eli vetojännityksen suuruus liitoksessa on pieni ja 2,5 kun vetojännitys

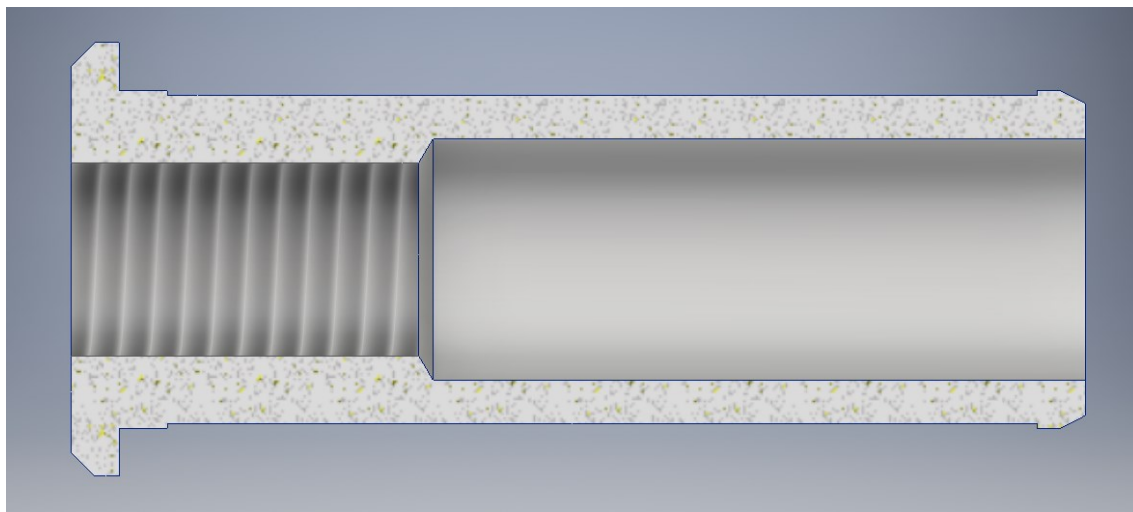
on suuri. Yli 500 h kestäväälle vaihtokuormitukselle on annettu vastaaviksi arvoiksi 7 ja 10. Määritetään vetojännitys pieneksi, sillä vaihtojännityksen keskijännitys on tarkasteltavassa tapauksessa lähellä nollaa eli kuormitus on veto- ja puristuspuolella lähes yhtä suuri. Näin ollen edellä esitetyllä Arenas et al. (2013) tutkimuksen suurimman leikkausmurtolujuuden arvolla 18,81 MPa saadaan laskettua liitoksen leikkausvaihtolujuuden arvoksi 12,54 MPa lyhytkestoisella kuormituksella ja 2,69 MPa pitkäkestoisella vaihtokuormituksella. Näitä vastaavat voimien arvot ovat 19,9 kN sekä 4,3 kN.

Tasalaatuksen ja toistettavan pintakäsittelyn saavuttamiseksi alumiiniholkkien pinnankäsittelyyn voidaan käyttää kappaleessa 2.3.2 esitettyä NaOH-peittausta. Peittauksella saavutettiin Hu et al. (2019) kokeissa 18,43 MPa leikkauslujuus kaksikomponenttiepoksiliimalla liimatussa alumiinikappaleiden välisessä liitoksessa, kun peittaukseen käytettiin 0,1M NaOH-liuosta. Tutkimuksessa esitellyllä hartsikäsittelyllä on raportin perusteella mahdollista parantaa peittauksella saavutettua leikkauslujuutta vielä noin 10 %. Toinen vaihtoehto alumiiniholkkien pintakäsittelyyn on mekaaninen käsittely hiomapaperilla. Kappaleessa 2.3.1 esitellyssä Kwon et al. (2019) tutkimuksessa todettiin koneellisen 180 s kestävä hiomakäsittelyn P120-hiomapaperilla antavan kaksikomponenttiepoksilla liimatulle hiilikuitu-alumiiniliitokselle leikkauslujuudeksi hieman päälle 20 MPa. Menetelmän huono puoli sylinterimäistä liimaliitosta ajatellen on se, että pienisäteisten kaarevien pintojen tasalaatuinen koneellinen käsittely on haastavaa. Hiomiseen tulisi täten valmistaa jokin erillinen työkalu tai vaihtoehtoisesti se tulisi suorittaa käsin erittäin huolellisesti. Kolmas vaihtoehto alumiinipinnan käsittelyyn on hiekkapuhallus, jota käsiteltiin tässä kappaleessa aikaisemmin esitellyssä Arenas et al. (2013) tutkimuksessa. Hiekkapuhalluksen kannalta sylinterimäiset pinnat eivät ole ongelma. Hiekkapuhaltamalla on myös mahdollista päästä hyvään toistettavuuteen, mikäli käsittelyn parametrit kuten hiomapartikkelien raekoko ja puhalluspaine sekä käsittelyaika pidetään vakioina.

Arenas et al. (2013) tutkimuksessa todettiin hiomapaperilla suoritettu mekaaninen hiominen parhaaksi vaihtoehdoksi hiilikuitukomposiittipinnan esikäsittelyyn. Hiilikuituputken sisäpinnan tasainen käsittely on käytännössä hyvin haastavaa muilla menetelmillä kuin hiomapaperin ja erillisen hiomatyökalun avulla. Irrotuskangaskäsittely ei sovellu tarkasteltavaan käyttökohteeseen, sillä liimattavia putkia

ei laminoida itse vaan ne tulevat suoraan toimittajalta. Hiilikuituputken sisäpinnan hiomisessa tulee kiinnittää erityisesti huomiota siihen, että hiomaparametrit kuten hioma-aika ja paine saadaan pidettynä vakiona työstettävien kappaleiden välillä, sillä työn jäljen tarkasteleminen ja vertaileminen jälkikäteen on hyvin haasteellista. Hiomamenetelmän kokeilemiseksi voidaan hionta suorittaa parille lyhyelle koepätkälle putkea ja hiomisen jälkeen putket voidaan halkaista pitkittäissuunnassa hiomajäljen tarkastelemiseksi.

Kuvassa 32 on esitetty liimattavan alumiiniholkin alustava poikkileikkausgeometria. Holkkiin on sorvattu ohuempi 36 mm pitkä osuus liimataskuksi. Liimataskun päissä on lähelle hiilikuitukomposiittiputken sisähalkaisijan nimellismittaa jätetyt kohdistusolakkeet, joiden avulla hiilikuituputki ja holkki saadaan paikoitettua täysin samansuuntaisiksi. Liimataskun syvyys määrittää liimakerroksen paksuuden. Liimakerroksen paksuudeksi määriteltiin 0,2 mm tarkasteltujen kirjallisuuslähteiden perusteella. 0,2 mm on todennäköisesti jonkin verran kyseisen liimaliitoksen kriittisen kerrospaksuuden alapuolella, jolloin liitoksen leikkauslujuudessa saavutetaan hienoinen etu. Kyseinen syvennys on kuitenkin riittävä mahdollistaakseen ilman korvautumisen ja liiman leviämisen koko liimataskun alalle kun liima pursotetaan taskuun.



Kuva 32. Alumiiniholkin alustava poikkileikkaus.

Alumiiniholkin geometria määräytyy hyvin pitkälti sen toimintavaatimusten ja mahdollisimman pieneksi optimoidun massan perusteella. Tästä aiheutuu se, että alumiiniholkkiin ruuvattavalle raidetangonpäälle tehdyt kierteet jatkuvat pituussuunnassa liimapinnan kohdalle. Tästä puolestaan seuraa, että holkin sisään ruuvattu raidetangonpää jäykistää holkin ulkopäätä huomattavasti. Liimattavien kappaleiden aksiaalisuuntaisen jäykkyyseron kannalta tämä aiheuttaa epäjatkuvuuskohdan kierteen päättymisen kohdalle, jolloin tähän pisteeseen muodostuu jännityshuippu. Jännityshuipun vaikutus



liimaliitoksen kuormitettavuuteen on vaikeasti ennustettavissa ilman FEM-laskentaa, mutta vaikutuksen minimoimisen kannalta on oleellista, että epäjatkuvuuskohdan reuna ei sijaitse aivan liimaliitoksen reunalla. Pultin jäykistämisen osuuden pituus on myös syytä minimoida, sillä lyhyemmällä matkalla ero liimattavien kappaleiden venymässä ei ehdi kasvaa niin suureksi, että jännitykset liimakerroksessa kasvavat suuriksi. Luonnollisesti alumiiniin tehdyn kierteen mekaaninen kesto on tässä kuitenkin päällimmäisenä suunnittelukriteerinä. Kierteen jälkeinen ohut osuus alumiiniholkista on seinämävahvuudeltaan 1,8 mm. Materiaalien jäykkyysero on näin ollen tällä osuudella hyvin pieni, sillä hiilikuituputken seinämävahvuus on koko matkalla 2 mm ja materiaalien kimmokertoimet ovat hiilikuituputken konstruktiosta riippuen samaa suuruusluokkaa, n. 70 GPa (Mäkelä et al. 2015, s. 151, Saarela et al. 2019, luvut 3.4 ja 6.4). Kierteitetyn epäjatkuvuuskohdan aiheuttamaa jännityshuippua voidaan tarvittaessa madaltaa pidentämällä viistettä kierteen ja holkin ohuen osan välillä.

Liimataskurakenteen takia liimakerroksen päätygeometrian optimointia ei voida soveltaa tarkasteltavassa käyttökohteessa, sillä holkkeihin jätetty paikoitusolake katkaisee yhtenäisen liimakerroksen ennen vapaata pintaa. Liimataskun päätyolakkeet viistämällä tai pyöristämällä voitaisiin mahdollisesti vaikuttaa liimataskun päätypinnan ja liimakerroksen rajapintaan muodostuvaan jännitykseen pehmentämällä terävässä särmässä syntyviä leikkaus- ja normaalijännityksen huippuja aivan kuten kappaleessa 2.2.1 esitetystä liimattavan kappaleen päätysärmen pyöristämiseen perustuvassa optimointimenetelmässä. Tämä voisi lisätä liitoksen kuormituksenkestoa marginaalisesti kasvattamalla vaurion ydintymiskuormaa.

## 4 YHTEENVETO

Autourheilun parissa komposiittimateriaalit ovat olleet käytössä huipputasolla jo vuosikymmeniä. Materiaalien saatavuuden helpottuminen ja niiden ymmärryksen kasvu on tuonut komposiittimateriaalit osaksi myös moottoriurheilun alempia tasoja. Samanaikaisesti ajoneuvoteollisuuden puolella pyritään kasvattamaan ajoneuvojen energiatehokkuutta ja hyötykuormia, jolloin komposiittimateriaaleja on alkanut ilmestyä käyttöön myös kuluttajamarkkinoille tarkoitetussa kalustossa. Korkeakouluopiskelijoista koostuvien joukkueiden välinen insinöörkilpailu Formula Student antaa myös opiskelijoille mahdollisuuden osallistua tähän kehitykseen.

Formula Student Oulu on perinteisesti hyödyntänyt teräsputkia ajoneuvojen pyöräntuennan muodostavien kolmiotukivarsien rakenteessa. Tämänkaltaisen rakenne on valmistettavuudeltaan sekä hinnaltaan kannattava ratkaisu vuosittain uusiksi rakennettavaan autoon. Varjopuolena tämänkaltaisessa ratkaisussa on osien paino. Nyt tiimi on ottanut tavoitteekseen keventää autoa vaihtamalla tukivarsien putkiosat hiilikuitukomposiittisiksi ja kiinnitysosat alumiinisiksi.

Ei-metallisen materiaalin liittämistä metalliseen materiaaliin on komposiittimateriaalien yleistymisen takia tutkittu laajasti. Liittämismenetelmiä on tarjolla useita; mekaanisista liitoksista hybridiratkaisuiden ja liimaamisen kautta hitsaamiseen. Hiilikuitutukivarsien liitos päätettiin tehdä liimaamalla liitoksen valmistettavuuden sekä hyvän ja ennustettavan kuormitettavuuden takia.

Onnistuneen liimaliitoksen aikaansaamiseksi tulee olla tietoinen tekijöistä, jotka vaikuttavat liitoksen kuormitettavuuteen. Tässä työssä on perehdytty liimaliitoksen optimointiin erityisenä huomion kohteena sylinterimäinen alumiinin ja hiilikuitukomposiitin välinen epoksiliimalla tehty liitos. Tutkimuksen kautta huomattiin, että liimaliitoksen optimointi perustuu pitkälti liimaliitoksen reunoissa esiintyvien jännityshuippujen pienentämiseen.

Syntyviin jännityshuippuihin voidaan vaikuttaa liimattavan kappaleen geometrian optimoinnilla. Liimattavien kappaleiden jäykkyysero kuormitus suunnassa tulisi minimoida. Lisäksi on kuormitettavuuden kannalta edullista, mikäli liimattava kappale voidaan suunnitella geometrialtaan ohuemmaksi liitoksessa syntyvien jännityshuippujen

kohdalta. Liimattavan kappaleen liimamateriaalin sisään jäävä särmä pyöristämällä voidaan vaikuttaa liimamateriaaliin ja kappaleen rajapintaan syntyvän paikallisen jännityshuipun suuruuteen pienentävästi, jolloin vaurio ydintyy liimamateriaalissa vasta suuremmalla kuormalla. Liimakerroksen päätyyn jäävän vapaan pinnan muodolla havaittiin myös olevan vaikutusta liitoksen kuormitettavuuteen. Suuremmalla pyöristyksen säteellä vaurio ydintyy suuremmalla pakkosiirtymän arvolla ja toisaalta vaurio myös etenee tällöin hitaammin.

Myös liiman ja liimattavan kappaleen välisellä adheesiolla havaittiin olevan vaikutusta liimaliitoksen kuormitettavuuteen. Tutkimuksien perusteella pinnankarheuden Ra-luku ei ole riittävä mittari pinnan liimattavuuden mittaamiseen. Pintaparin kuormitettavuuden selvittämiseksi tulee kappaleiden todellisten pintaenergioiden suuruus määrittää esimerkiksi kontaktikulmamittauksen avulla. Tutkimuksissa suoritettujen mittauksien avulla on selvää, että mekaanisesti hiomalla saavutetaan suurin pintaenergian arvo riittävän pitkään jatkuneella hiomisella ja riittävän karkealla hiomapaperilla.

Metallisille liimattaville kappaleille kemiallinen käsittely on toistettavuudeltaan hyvä vaihtoehto pintakäsittelyksi. Natriumhydroksidipeittauksella käsitellyn alumiinikappaleen ja hiilikuitukomposiitin välille saatiin tarkastellussa tutkimuksessa lähes vastaavia keskimääräisen leikkauslujuuden arvoja kuin mekaanisesti käsiteltyjen alumiinikappaleiden välille. Tämän lisäksi havaittiin hartsi-asetoniliuoskäsittelyllä saavutettavan yli 10 % parannus liitoksen leikkauslujuuteen.

Tukivarsien päätyihin liimattavissa alumiiniholkeissa kappaleiden kuormituksen suuntainen jäykkyysero on minimoitu esitetyssä geometriassa. Epäjatkuvuuskohdan aiheuttaa kierteitetty pääty, jossa alumiinin jäykkyys kasvaa nopeasti hyvin suureksi sisään ruuvattavan raidetangonpään takia. Epäjatkuvuuskohdan vaikutus voidaan minimoida siirtämällä se pois liimakerroksen reunassa vallitsevien jännityshuippujen kohdalta. Jäykemmän osuuden muodostamien jännityshuippujen minimoinnin takia on myös tärkeää, että sen pituus minimoidaan. Pintakäsittelyprosessin toistettavuuden takia NaOH-peittaus on hyvä vaihtoehto alumiiniholkin pintakäsittelyyn ennen liimausta. Hiilikuituputken sisäpinta joudutaan käsittelemään mekaanisesti hiomapaperilla, ja tätä varten on valmistettava erillinen työkalu, jolla hionta voidaan suorittaa kontrolloidusti.

## LÄHDELUETTELO

3M, 2021. Categorizing Surface Energy [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.3m.com/3M/en\\_US/bonding-and-assembly-vn/resources/science-of-adhesion/categorizing-surface-energy/](https://www.3m.com/3M/en_US/bonding-and-assembly-vn/resources/science-of-adhesion/categorizing-surface-energy/) [viitattu 9.2.2021].

Apalak, M. K. & Engin, A., 2004. Effect of adhesive free-end geometry on the initiation and propagation of damaged zones in adhesively bonded lap joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(5), s. 529–559.

Arenas, J. M., Alía, C., Narbón, J. J., Ocaña, R. & González, C., 2013. Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium-composite material bonding. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), s. 417–423.

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J. & Salonen, P., 2014. Koneenosien suunnittelu. 6. p. Helsinki: Sanoma Pro.

Cognard, J. Y., Devaux, H. & Sohier, L., 2010. Numerical analysis and optimisation of cylindrical adhesive joints under tensile loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(8), s. 706–719.

Dorn, L., 1994. Adhesive Bonding - Terms and Definitions. TALAT Lecture 4701.

Ebnesajjad, S., 2011. *Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing*. Amsterdam: Elsevier/William Andrew.

Ebnesajjad, S. & Ebnesajjad, C., 2014. *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*. 2. p. Amsterdam: Elsevier/William Andrew.

Federation of European Producers of Abrasives. Abrasive grains: Grit sizes [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fepa-abrasives.com/abrasive-products/grains> [viitattu 23.4. 2020].

Groth, H. L. & Nordlund, P., 1991. Shape optimization of bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 11(4), s. 204–212.

Henkel Adhesive Technologies, 2019. Technical Data Sheet - LOCTITE EA 9466 [verkkodokumentti]. Saatavissa:

[http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/243\\_NEW-](http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/243_NEW-)

[EN?pid=EA\\_9466&format=MTR&subformat=REAC&language=EN&plant=WERCS](http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/243_NEW-EN?pid=EA_9466&format=MTR&subformat=REAC&language=EN&plant=WERCS) [viitattu 2.2.2021].

Hu, Y., Yuan, B., Cheng, F. & Hu, X., 2019. NaOH etching and resin pre-coating treatments for stronger adhesive bonding between CFRP and aluminium alloy. *Composites Part B-Engineering*, 178, p. 107478.

Kwon, D. J., Kim, J. H., Kim, Y. J., Kim, J. J., Park, S. M., Kwon, I. J., Shin, P. S., DeVries, L. K. & Park, J. M., 2019. Comparison of interfacial adhesion of hybrid materials of aluminum/carbon fiber reinforced epoxy composites with different surface roughness. *Composites Part B: Engineering*, 170, s. 11–18.

Lavalette, N. P., 2020. Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints. *Composite structures*, 240, p. 112077.

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J., 2015. Tekniikan kaavasto: matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 14. p. Tampere: Tammertekniikka.

National Physical Laboratory, 2007. NPL Manual - Design and Testing of Bonded and Bolted Joints [verkkodokumentti]. Saatavissa: [http://resource.npl.co.uk/docs/science\\_technology/materials/materials\\_areas/adhesives/publications/manuals/bonded\\_bolted.pdf](http://resource.npl.co.uk/docs/science_technology/materials/materials_areas/adhesives/publications/manuals/bonded_bolted.pdf) [viitattu 2.2.2021].

Pere, A., 2012. Koneenpiirustus 1&2. 11. p. Espoo: Kirpe.

Plastics Design Library, 2008. Handbook of plastics joining: A practical guide. 2. p.

Pramanik, A., Basak, A. K., Dong, Y., Sarker, P. K., Uddin, M. S., Littlefair, G., Dixit, A. R. & Chattopadhyaya, S., 2017. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys - A review. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 101, s. 1–29.

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V., 2019. Komposiittirakenteet. Saatavissa: <https://www.lujitemuovi.fi/>.

Sancaktar, E. & Simmons, S. R., 2000. Optimization of adhesively-bonded single lap joints by adherend notching. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(11), s. 1363–1404.

Schuster, J. M., Schvezov, C. E. & Rosenberger, M. R., 2015. Analysis of the Results of Surface Free Energy Measurement of Ti6Al4V by Different Methods. *Procedia Materials Science*, 8, s. 732–741.

Vihelä, V., 2019. Kontaktikulma- ja pintaenergiamittalaitteen käyttöönotto ja mittausten optimointi paperinäytteille. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto.

Xu, W., 2013. Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 40, s. 158–167.

Yang, S., Xu, W., Liang, L., Wang, T. & Wei, Y., 2014. An experimental study on the dependence of the strength of adhesively bonded joints with thickness and mechanical properties of the adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(11), s. 1055–1071.

Zhao, X., Adams, R. D. & Da Silva, L. F. M., 2011. Single lap joints with rounded adherend corners: Stress and strain analysis. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(8), s. 819–836.